

UNIVERSITE DE RENNES I
FACULTE DE MEDECINE
ECOLE D'AUDIOPROTHESE J.E. BERTIN DE FOUGERES

**Reproductibilité et sensibilité de
l'analyse ATEC :
Enveloppes temporelles,
traits acoustiques et traits articulatoires.**

MEMOIRE SOUTENU EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLOME D'ETAT D'AUDIOPROTHESE

PAR

Nathalie MENARD

Sous la direction de
Monsieur Frank LEFEVRE
Maître de mémoire

Année 2007

Remerciements

A M. LEFEVRE pour votre disponibilité, votre passion du métier, votre patience durant mon apprentissage et votre aide précieuse à la mise en œuvre de ce mémoire.

A Christelle pour ton enthousiasme, ta vitalité et tes conseils multiples.

A Guillaume et Anne pour votre bonne humeur et votre soutien très utile.

A Mme FRANKLIN et M. LAURENT, mes premiers maîtres de stage, pour vos conseils, votre sympathie et votre disponibilité lors de ma formation.

A tous les patients qui ont accepté d'expérimenter mes tests et qui m'ont fait confiance en rendez-vous.

Aux professeurs de l'école J.E. BERTIN pour leur disponibilité, leur professionnalisme et leur passion.

A ma famille pour la lecture et les corrections faites sur ce mémoire. Merci à mes parents de m'avoir permis de terminer cette deuxième formation.

Résumé

Ce mémoire constitue une des phases du projet ATEC (Audiological Temporal Envelopes Comparison) initié en 2004 par F. Lefèvre. Il se base sur l'idée que l'enveloppe temporelle véhicule des informations indispensables à la compréhension de la parole.

Les étapes précédentes de l'ATEC ont mené à la création d'un logiciel de comparaison des enveloppes temporelles du français. Il permet d'analyser les confusions phonétiques des malentendants et, à terme, d'aider au réglage des appareils de correction auditive. Avant d'utiliser cet outil en rendez-vous, il nous a semblé intéressant :

- De le développer pour créer un instrument commun entre les audioprothésistes et les orthophonistes. Nous avons donc ajouté les traits acoustiques et articulatoires aux paramètres temporels analysés dans l'ATEC.
- De vérifier la reproductibilité de ce test composé de sept listes différentes.
- D'étudier sa sensibilité aux différents types de surdité et au port des prothèses auditives.

Mots clés

Enveloppes temporelles, Traits articulatoires, Traits acoustiques,
Programmation, Base de données,
Facteur de crête, Profondeur de modulation, Dynamique, Valeur RMS,
Reproductibilité, Sensibilité.

Table des matières

Introduction	5
<u>Premier chapitre : Rappels sur la structure de la parole</u>	<u>7</u>
<u>1.1. Les unités de parole</u>	<u>7</u>
<u>1.2. Les structures acoustiques de la parole.....</u>	<u>8</u>
1.2.1. Rappels anatomiques et physiologiques de production de la parole .	8
1.2.2. Indices acoustiques.....	10
1.2.3. Traits acoustiques	13
1.2.4. Zones fréquentielles de la parole	14
<u>1.3. Les trois dimensions de la parole et ses représentations graphiques.....</u>	<u>15</u>
1.3.1. L'oscillogramme	15
1.3.2. Le spectre.....	15
1.3.3. Le spectrogramme	16
<u>1.4. L'information temporelle dans la parole</u>	<u>17</u>
1.4.1. Définition de l'enveloppe temporelle	17
1.4.2. Caractéristiques de l'enveloppe temporelle de la parole.....	18
1.4.3. L'importance de l'enveloppe temporelle dans la perception de la parole	19

Deuxième chapitre : Rappels sur la mise en place de l'ATEC .22

<u>2.1. Le répertoire d'enveloppes temporelles</u>	<u>22</u>
2.1.1. Le choix des TSI (Tri Syllabes Identiques).....	22
2.1.2. L'extraction des enveloppes temporelles	24
2.1.3. Les indices temporels retenus.....	25
<u>2.2. Le test syllabique</u>	<u>27</u>
2.2.1. La conception des listes	27
2.2.2. La validation du test syllabique	28
<u>2.3. La création du logiciel</u>	<u>29</u>
2.3.1. Le cahier des charges	29
2.3.2. Mode d'emploi et présentation du logiciel	31
<u>2.4. La modification de la base de données</u>	<u>34</u>

Troisième chapitre : Intégration des traits articulatoires et acoustiques à l'ATEC35

<u>3.1. Rappels de phonétique acoustique</u>	<u>35</u>
3.1.1. Les voyelles.....	35
3.1.2. Les consonnes	36
<u>3.2. Rappels de phonétique articulatoire.....</u>	<u>37</u>
3.2.1. Les voyelles.....	37
3.2.2. Les consonnes	39
<u>3.3. Intégration des traits à l'ATEC</u>	<u>41</u>
3.3.1. Programmation.....	41
3.3.2. Mode d'emploi de l'ATEC_v1_4.....	43
3.3.3. Les améliorations à effectuer	45

Quatrième chapitre : Etude de la reproductibilité de l’ATEC ...46

<u>4.1. Conditions du test</u>	<u>46</u>
4.1.1. Population étudiée.....	46
4.1.2. Matériel utilisé	46
4.1.3. Déroulement des tests	47
<u>4.2. Analyses statistiques.....</u>	<u>48</u>
<u>4.3. Résultats sur les enveloppes temporelles.....</u>	<u>49</u>
4.3.1. Reproductibilité des résultats entre les sept listes	49
4.3.2. Corrélation moyenne / écart type	54
<u>4.4. Résultats sur les traits articulatoires et acoustiques</u>	<u>55</u>
<u>4.5. Conclusions et discussions</u>	<u>57</u>

Cinquième chapitre : Etude de la sensibilité fréquentielle de l’ATEC à l’audiogramme tonal58

<u>5.1. Conditions du test</u>	<u>59</u>
5.1.1. Population étudiée.....	59
5.1.2. Conditions techniques du test	59
5.1.3. Déroulement des tests	59
<u>5.2. Analyses statistiques et résultats</u>	<u>61</u>
5.2.1. Les six bandes de fréquences.....	61
5.2.2. Comparaison des bandes de fréquences 50-1000 Hz et 1-8 KHz ...	71
<u>5.3. Conclusions et discussions</u>	<u>77</u>

<u>Sixième chapitre : Etude de la sensibilité de l'ATEC aux</u> <u>différences de perceptions syllabiques avec et sans</u> <u>appareil</u>	<u>78</u>
<u>6.1. Conditions du test</u>	<u>79</u>
6.1.1. Population étudiée.....	79
6.1.2. Conditions techniques du test	79
6.1.3. Déroulement des tests	79
<u>6.2. Analyses statistiques et résultats</u>	<u>80</u>
<u>6.3. Conclusions et discussions</u>	<u>85</u>
Conclusion générale	86
Annexes.....	88
Index des graphiques et tableaux.....	97
Bibliographie	100

Introduction

De nombreuses études ont démontré aujourd'hui la place essentielle de l'enveloppe temporelle (modulations lentes d'intensité) dans l'intelligibilité de la parole. Or, dans les surdités cochléaires, cas majoritairement rencontrés chez l'audioprothésiste, l'utilisation de l'information temporelle reste optimale.

Intéressé par ces observations, F. Lefèvre a décidé de se baser sur les propriétés de l'enveloppe temporelle afin d'analyser les confusions phonétiques de ses patients et, à terme, d'aider au réglage des appareils de correction auditive. Il a appelé ce projet : l'ATEC (Audiological Temporal Envelopes Comparison).

Ce mémoire constitue une nouvelle étape de ce projet commencé en 2004, avec l'aide de ses étudiants.

Quatre étapes étaient prévues :

- Création du test syllabique (Anthony Arrigoni, 2004) pour mesurer les confusions phonétiques des patients [2].
- Etablissement d'un répertoire d'enveloppes temporelles des 180 syllabes de la langue française (Cécile Château, 2005) [3].
- Création d'un logiciel de comparaison automatique des confusions phonétiques (Patrice Souêtre, 2006) [21].
- Mesures physiques et conseils de réglage des appareils de correction auditive au regard des informations obtenues à l'aide du logiciel.

Les trois premières étapes ont permis de créer un outil qui analyse, grâce au répertoire d'enveloppe temporelle, les confusions phonétiques relevées par le test syllabique. Il est maintenant intéressant de vérifier sa fiabilité, objet du présent mémoire.

Pendant la préparation de ce mémoire, nous avons pu discuter avec des orthophonistes et nous avons souhaité créer un test commun entre nos deux professions. Nous avons donc, dans un premier temps, rajouté les traits acoustiques et articulatoires aux paramètres temporels étudiés dans l'ATEC.

Ensuite, nous avons testé la fiabilité de l'ATEC à travers trois études :

- La reproductibilité du test.
- La sensibilité fréquentielle de l'ATEC aux différents types de surdités.
- Enfin, le but ultime de l'ATEC est d'aider au réglage des prothèses auditives.

Il faut donc vérifier que ses résultats sont sensibles au port des appareils.

Ces trois études n'ont jamais été effectuées pour quelque test que ce soit. Les résultats que nous obtiendront sont donc difficilement prévisibles.

Premier chapitre : Rappels sur la structure de la parole

1.1. Les unités de parole

La parole est constituée de différentes unités sonores :

- **La phrase** est un assemblage linguistique d'unités qui font sens (les mots).
- **Le mot** est un groupe de sons d'une langue auquel est associé un sens, formant ainsi une unité autonome.
- **La syllabe** est l'unité phonétique fondamentale qui se prononce d'une seule émission de voix. Il s'agit d'une voyelle isolée ou associée à une ou plusieurs consonnes. La syllabe ouverte se termine par une voyelle prononcée. Alors que si la syllabe se termine par une consonne prononcée, on parle de syllabe fermée.
- **Les phonèmes** correspondent aux plus petites unités sonores permettant de décomposer et de différencier les signaux de paroles. Ils n'ont pas de signification propre et certains d'entre eux ne sont pas prononçables isolément [19]. Une combinaison de phonèmes ne comportant aucun sens est nommée logatome [12]. Certaines langues possèdent plus de phonèmes que d'autres mais toutes ont en commun le fait qu'elles construisent leurs mots à partir d'un nombre limité de phonèmes [26]. Par exemple, le français en comprend 36 (16 voyelles et 20 consonnes). Les linguistes ont généré une classification de la structure acoustique de chaque phonème en créant les indices et traits acoustiques.

1.2. Les structures acoustiques de la parole

Avant d'entrer dans le détail des indices et des traits acoustiques, un rappel anatomique et physiologique de la phonation s'impose.

1.2.1. Rappels anatomiques et physiologiques de production de la parole

Les sons de la parole se produisent normalement lors de l'expiration grâce à un flux d'air contrôlé, en provenance des poumons et passant par la trachée. L'air pulmonaire expulsé va rencontrer sur son passage plusieurs obstacles potentiels qui vont le modifier de manière plus ou moins importante. [20] [24]

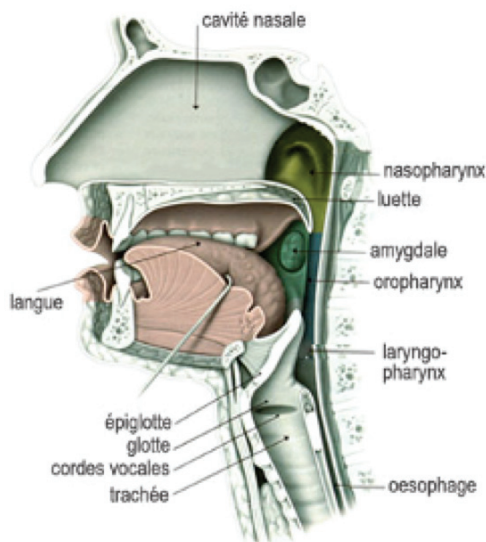


Figure 1 : Anatomie de l'appareil phonatoire

Après le passage par la trachée, le flux d'air entre dans un conduit cartilagineux, appelé le larynx. Formé de quatre cartilages, celui-ci peut se déplacer vers le bas ou vers le haut, modifiant ainsi la longueur de la cavité pharyngienne. [20]

A l'intérieur du larynx se situent les cordes vocales, organes vibratoires constitués de tissus musculaires et de tissus conjonctifs résistant qui peuvent s'écarter ou s'accoler. L'espace entre les cordes vocales est appelé la glotte. [20] [24]

Les cordes vocales constituent une source vibratoire, modifiant le flux d'air. Au passage de l'air, les cordes vocales se mettent à vibrer à condition d'être suffisamment rapprochées et relâchées. Le mouvement vibratoire correspond à une succession plus ou moins rapide de cycles d'ouverture et de fermeture de la glotte. [24]

Ensuite, l'air laryngé passe dans le conduit vocal qui mesure entre 17 et 18 cm. Le conduit vocal comprend plusieurs cavités supra glottiques reliées entre elles. Chacune d'elle fonctionne comme résonateur et confie au flux laryngé des caractéristiques acoustiques précises :

- Le pharynx (cavité pharyngale) : il s'agit d'un conduit musculo-membraneux situé entre la bouche et l'œsophage d'une part, et entre les fosses nasales et le larynx d'autre part. La paroi du pharynx est constituée de muscles constricteurs disposés pour la plupart en anneaux. Ces muscles ont pour rôle de modifier le diamètre de la cavité pharyngale. La racine de la langue peut également reculer ou avancer et donc agir sur le volume de cette première cavité supra glottique.
- Les fosses nasales (cavités nasales) : l'air passe par le nez lorsque le voile du palais est rabaissé, laissant le passage oro-nasal ouvert.
- La bouche (cavité buccale) : séparée des fosses nasales par une cloison appelée le palais, elle comporte deux types d'articulateurs :
 - Les articulateurs fixes : dents supérieures et inférieures, alvéoles, palais.
 - Les articulateurs mobiles : lèvres supérieure et inférieure, langue, voile du palais.

1.2.2. Indices acoustiques

Il existe de nombreux indices acoustiques plus ou moins intéressants. Selon F. Lefèvre [13], les plus pertinents sont des éléments spectraux qui permettent de ne pas confondre deux phonèmes différents. Voici les indices acoustiques principaux :

1.2.2.1. Le fondamental laryngé

Comme nous l'avons vu précédemment, la vibration des cordes vocales engendre le flux laryngé (périodique) : c'est ce que l'on appelle le fondamental laryngé. La hauteur de la voix dépend du nombre d'impulsions émises à la seconde (150 en moyenne chez un homme, 250 à 300 chez une femme, et 300 et plus chez un enfant) [12].

Lorsque le fondamental laryngé est présent pendant l'émission d'un phonème, on le dit voisé ou sonore, sinon il est dit non voisé ou sourd.

1.2.2.2. Les formants

Les cavités supra laryngées agissent comme des résonateurs qui renforcent des zones fréquentielles particulières du fondamental laryngé [15]. Ces résonances sont appelées les formants.

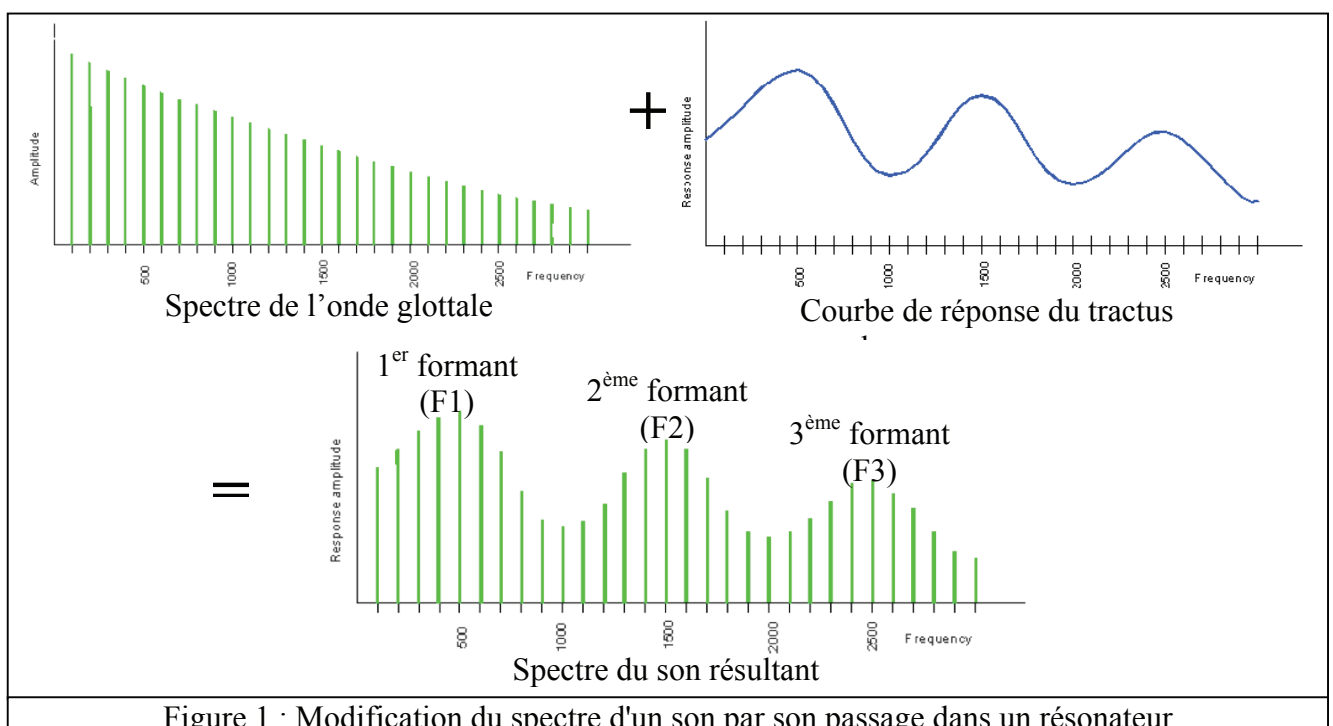


Figure 1 : Modification du spectre d'un son par son passage dans un résonateur

Chaque voyelle est reconnaissable par ses formants. Par exemple les trois premiers formants du /a/ sont à 750, 1300 et 2500 Hz ; ceux du /i/ sont à 250, 2400 et 2900 Hz.

La composition formantique de chaque voyelle est indépendante de la hauteur du son fondamental. Ainsi, que l'on soit un homme, une femme ou un enfant, on prononce les mêmes voyelles [3]. Une voyelle peut comporter une demi-douzaine de formants, mais seul le premier (créé par le pharynx) et le deuxième (créé par la cavité buccale) restent des indices pertinents de la perception des voyelles. La valeur fréquentielle du premier formant varie entre 250 et 750 Hz, celle du deuxième formant entre 750 et 2500 Hz [15]

Dans le cas des voyelles nasales, la cavité nasale est mise en résonance par abaissement du voile du palais. Cette nasalité est marquée par la faiblesse énergétique du premier formant et l'existence de trois formants de nasalité à 250, 1000 et 2000 Hz. [5]

Certaines consonnes comportent, dans leur structure acoustique, des formants comme ceux des voyelles. Ce type d'indice présente une intensité bien inférieure aux formants des voyelles. [15]

1.2.2.3. Les transitions formantiques

Deux phonèmes juxtaposés interagissent l'un sur l'autre. La consonne provoque une modification de la valeur fréquentielle, ainsi qu'un affaiblissement d'intensité des formants de la voyelle juxtaposée. Ce phénomène caractéristique des consonnes est appelé transition formantique. [15]

La direction prise par la transition du deuxième formant est particulièrement importante. Elle suffit, à elle seule, à transmettre les « squelettes sémantiques » des mots et à permettre une intelligibilité satisfaisante de la parole. [26]

1.2.2.4. Les bruits d'explosion et de friction

Les bruits d'explosion et les bruits de friction sont des indices pertinents des consonnes. Ils résultent d'une entrave mise au passage de l'air au niveau des organes supra glottiques ; cette entrave peut être provoquée par une fermeture (occlusion) ou par un rétrécissement sur le trajet de l'air (constriction), cela détermine le mode d'articulation. Le lieu d'articulation est l'endroit où se réalise l'occlusion ou la constriction.

Les bruits d'explosion résultent du relâchement brusque de la tension musculaire qui libère l'air accumulé dans les cavités pendant l'occlusion : il est caractéristique des plosives (ou occlusives : /p/, /t/, /k/, /b/, /d/ et /g/).

Les bruits de friction sont engendrés par le passage continu du flux d'air dans un rétrécissement du canal vocal : il est présent dans les consonnes dites fricatives (ou constrictives : /f/, /s/, /ʃ/, /v/, /z/ et /ʒ/).

Les consonnes voisées présentent un bruit plus faible que les consonnes non voisées. [3]

1.2.2.5. Le VOT

Le VOT (Voice Onset Time) est un des indices temporels des occlusives. Il s'agit de l'intervalle séparant le début de l'explosion du début de la vibration des cordes vocales. [26] S'il est négatif ou nul, le voisement de l'occlusive sera perçu, sinon la consonne sera perçue comme non voisée.

1.2.2.6. Résumé

La présence du fondamental laryngé, la hauteur du premier et du deuxième formant constituent les indices pertinents des voyelles.

Pour les consonnes, il s'agit de la présence ou l'absence d'un fondamental laryngé, d'un premier formant, d'un deuxième formant, d'un bruit de friction ou d'un bruit d'explosion. [13]

1.2.3. Traits acoustiques

Chaque phonème de chaque système phonétique est constitué par un faisceau de traits distinctifs binaires pouvant chacun prendre une valeur positive ou négative. [4] Ces traits distinctifs acoustiques ont été décrits et formalisés par les travaux de Jakobson en 1958. Les phonèmes du français sont caractérisés par six principales paires de traits. [4] [12]

➤ **Aigu/grave** : ce trait de tonalité traduit la prédominance de la partie haute ou basse du spectre fréquentiel sur l'autre. Pour les voyelles, ce trait est caractérisé par la position fréquentielle de F2. Pour les consonnes, les fréquences du pôle de bruit et/ou la direction des transitions de F2 indiquent si le phonème est grave ou aigu.

➤ **Compact/diffus** : le trait de compacité exprime une accumulation d'énergie acoustique dans la région centrale du spectre fréquentiel, alors que le trait diffus décrit une dispersion de l'énergie sur l'ensemble du spectre fréquentiel.

- **Sonore (voisé)/sourde (non voisé)** : le trait de voisement est caractérisé par la présence de la vibration des cordes vocales (fondamental laryngé). Le fondamental laryngé s'interrompt lors de la prononciation d'un phonème sourd.
- **Vocalique/non vocalique** : un phonème vocalique contient des formants.
- **Oral/nasal** : le trait de nasalité est caractérisé par la mise en résonance nasale grâce à l'abaissement du voile du palais. La structure du phonème comprend alors un formant de nasalité.
- **Continu/interrompu** : un phonème est continu quand sa structure acoustique est continue dans le temps. Une attaque abrupte distingue les occlusives qui sont discontinues des fricatives qui sont continues.

Ces six paires de traits peuvent être regroupé en deux grands groupes :

- Les traits **fréquentiels** : (aigu/grave, oral/nasal, compact/diffus) dont la perception dépend majoritairement de l'acuité fréquentielle.
- Les traits **temporels** : (voisé/non voisé, continu/interrompu, sourd/sonore) dont la perception dépend majoritairement de l'acuité temporelle.

1.2.4. Zones fréquentielles de la parole

Les fréquences inférieures à 500 Hz contiennent 60% de l'énergie de la parole, mais contribuent seulement à 5% de son intelligibilité. Au contraire, les fréquences supérieures à 1000 Hz représentent seulement 5% de l'énergie de la voix et contiennent 60% des éléments pertinents permettant sa reconnaissance. [3] [9] [11]

Les fréquences de meilleure intelligibilité s'étendent de 400 à 4000 Hz. Plus spécifiquement, la zone fréquentielle située autour de 2000 Hz est particulièrement importante pour l'intelligibilité [15]. D'après J.C. Lafon (1985), 1000, 2000, 4000 Hz sont les octaves par lesquelles transitent les informations acoustiques où est représentée presque la totalité des traits pertinents responsables de la reconnaissance des structures phonétiques de la parole. [3]

1.3. Les trois dimensions de la parole et ses représentations graphiques

La parole est un signal complexe qui contient à la fois de l'information temporelle et de l'information fréquentielle. [6]

En acoustique, le son se définit en fonction de son amplitude (intensité), de sa durée (temps) et de son timbre qui résulte de sa composition spectrale, c'est-à-dire de la fréquence et de l'amplitude de ses composantes.

1.3.1. L'oscillogramme

L'oscillogramme est la représentation de l'évolution temporelle des changements d'amplitude (les variations de la pression sonore) du signal. C'est la représentation la plus simple du signal acoustique. Il ne montre que l'information temporelle de la parole.

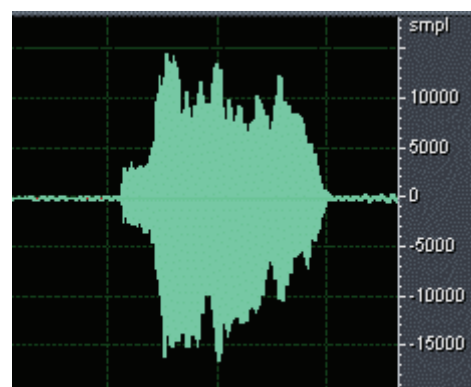


Figure 2 : Oscillogramme

Il nous permet de visualiser l'accent, le rythme, les pauses et le voisement, et de voir qu'en règle générale, les voyelles sont plus intenses que les consonnes. L'alternance entre consonnes et voyelles crée une oscillation d'intensité à une cadence moyenne de trois fois par seconde. [6]

1.3.2. Le spectre

Le spectre est la représentation de l'amplitude en fonction de la fréquence à un instant donné. Il permet la visualisation du timbre, du voisement et des formants. [6]

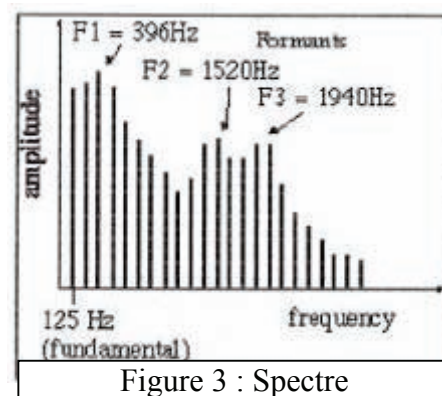
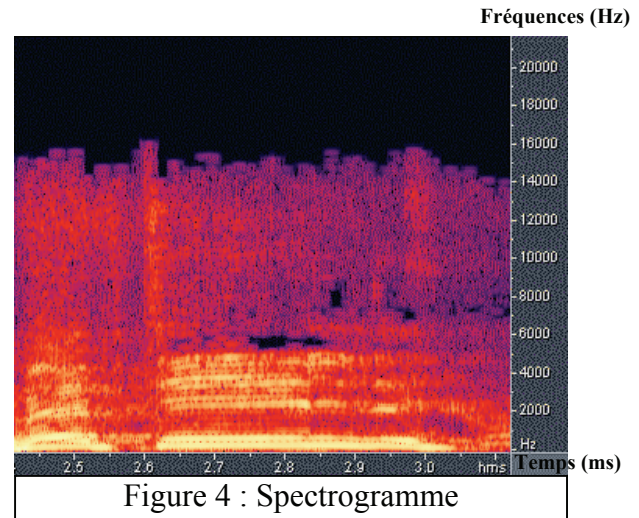


Figure 3 : Spectre

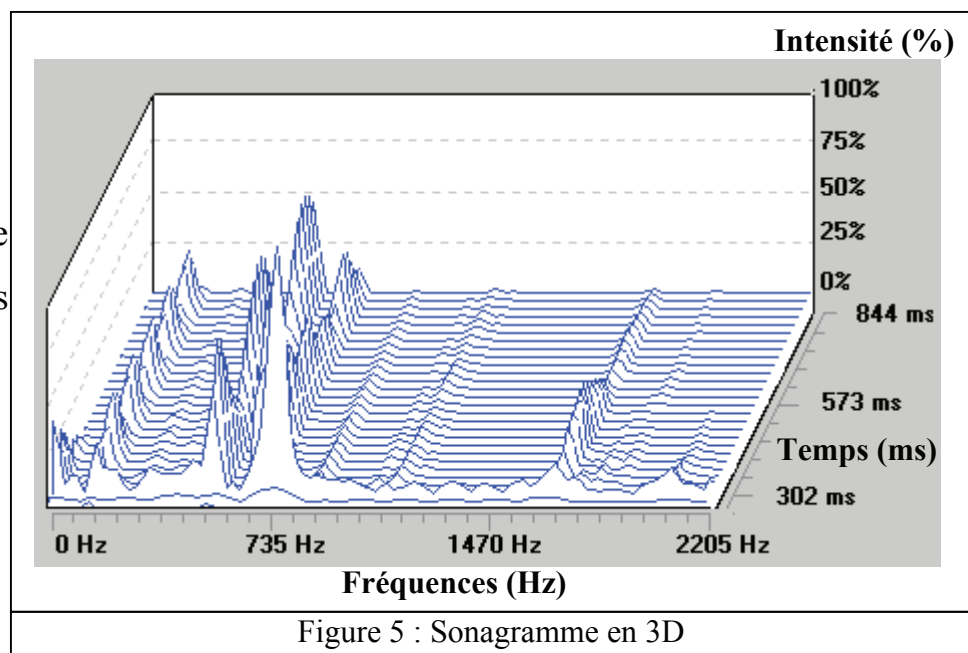
1.3.3. Le spectrogramme

Pour visualiser l'évolution du spectre en fonction du temps, on utilise un diagramme temps-fréquence sur lequel la couleur (ou en noir et blanc, le degré de noircissement) indique l'intensité de la composante spectrale. Ce diagramme s'appelle spectrogramme ou sonagramme, il représente l'évolution temporelle de la fréquence et de l'amplitude.



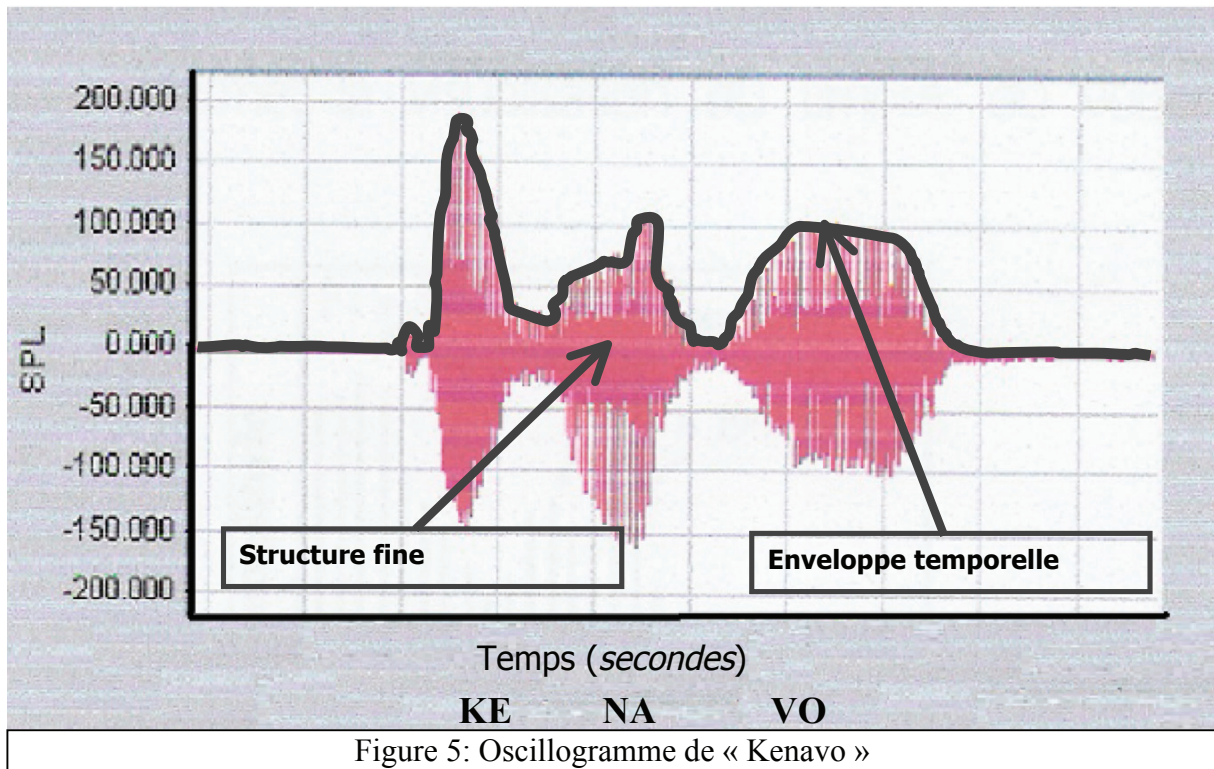
Le sonagramme montre à la fois l'information temporelle et l'information fréquentielle. Les zones jaunes dans le sonagramme signifient que le signal acoustique a beaucoup d'énergie à un moment défini par l'axe horizontal, et pour une fréquence définie sur l'axe vertical. [6]

On peut aussi le représenter en trois dimensions :



1.4. L'information temporelle dans la parole

1.4.1. Définition de l'enveloppe temporelle



Voici l'oscillogramme du mot « Kenavo ».

On peut remarquer :

- Une variation rapide de l'intensité : il s'agit de la « structure fine » (en rose sur le graphique)
- Une variation plus lente appelée « enveloppe temporelle » (en noir sur le graphique). Selon F. Apoux et C. Lorenzi, l'enveloppe temporelle, au sens strict, correspond aux fluctuations lentes d'intensité, comprises entre 2 et 50 Hz environ. [18]
- Les fluctuations de l'énergie globale du signal correspondant à l'alternance de voyelles (forte intensité) et de consonnes (énergie faible) [3].

1.4.2. Caractéristiques de l'enveloppe temporelle de la parole

Selon B. Hugon et al [7], une vibration modulée en amplitude se caractérise par trois paramètres:

- La fréquence porteuse qui « porte » la modulation (c'est-à-dire la structure fine).
- La fréquence de modulation qui représente la vitesse de variation de l'amplitude de l'onde porteuse (c'est-à-dire l'enveloppe du signal).
- Le taux (ou index) de modulation (m avec $0 \leq m \leq 1$) qui représente l'importance de la variation d'amplitude. On utilise également la notion de profondeur de modulation (p_m) exprimée en dB et liée à m par la relation :

$$p_m = 20 \log [(1+m) / (1-m)]$$

En ce qui concerne la parole, les caractéristiques des différents paramètres de la modulation d'amplitude sont décrites par B. Hugon et al [7] comme suit:

- La fréquence porteuse varie sur l'ensemble du spectre de la parole, c'est-à-dire d'environ 150 à 8000 Hz, c'est la structure fine.
- La fréquence de modulation est plus ou moins rapide, elle passe de moins de 1 Hz à environ 30 Hz, lorsque l'on considère la durée d'une occlusive ou celle d'un mot.
- La profondeur de modulation est d'environ 30 dB pour une situation donnée.

Selon S. Rosen [3], l'information temporelle se décompose en trois informations en fonction des modulations dominantes :

- L'enveloppe, au sens strict, qui comprend les modulations les plus lentes, comprises entre 2 et 50 Hz.
- L'information de périodicité, contenue dans les modulations de 50 à 500 Hz.
- La structure fine, soit les fluctuations entre 600 Hz et 10 kHz.

Pour la plupart des auteurs, l'enveloppe temporelle au sens large est constituée des modulations d'amplitudes inférieures à 500 Hz (parfois 1000 Hz). [18]

1.4.3. L'importance de l'enveloppe temporelle dans la perception de la parole

De nombreux travaux ont démontré l'importance de l'enveloppe temporelle pour la compréhension de la parole. C. Château a fait une synthèse détaillée de ces expériences dans son mémoire présenté en 2005 en vue de l'obtention du Diplôme d'Etat d'Audioprothésiste [3]. On peut retenir :

- La TMTF (Temporal Modulation Transfer Function) développée par Viemeister en 1979. Cette étude montre que la sensibilité d'une oreille normo entendante aux modulations d'amplitude d'un signal est constante jusqu'à 16 à 64 Hz selon les sujets puis décroît progressivement.

➤ Le STI (Speech Transmission Index) de Steeneken et Houtgast a permis de démontrer le rôle majeur des fluctuations lentes de l'amplitude des signaux de parole dans l'intelligibilité. Ils ont aussi prouvé que le spectre de modulation de l'enveloppe d'un discours enregistré dans différentes conditions présente un maximum autour de 3 Hz, quelle que soit la bande fréquentielle considérée. Il est intéressant de souligner que cette fréquence de modulation correspond au rythme syllabique.

Ces deux études permettent de conclure qu'en terme de résolution temporelle, le système auditif est bien adapté à la parole humaine : les fréquences de modulation qui dominent dans la parole sont aussi les mieux perçues par des auditeurs normo entendants. De plus, ces modulations d'amplitude jouent un rôle majeur dans l'intelligibilité de signaux de parole :

➤ S. Rosen en 1992 montra que les fluctuations d'amplitude de la parole les plus lentes, comprises entre 2 et 50 Hz, déterminent les traits acoustiques d'intensité, de durée, d'attaque et de descente. Elles véhiculent différents types d'informations linguistiques :

➤ Des indices sur le mode d'articulation : distinction entre une compacte et une diffuse et entre une non-voisée et une voisée (temps d'attaque et de chute différents).

➤ Des indices sur le voisement : différences d'amplitude, intervalles de silence.

➤ Des indices prosodiques : rôle dans la délimitation des unités linguistiques.

➤ La forme de l'enveloppe est également impliquée dans la perception du timbre ainsi que dans la sensation de rythme.

➤ S. Rosen démontra aussi que les fluctuations plus rapides, comprises entre 50 et 500 Hz, correspondent à la périodicité véhiculant deux types de traits linguistiques :

➤ Des informations segmentales à propos du voisement et du mode d'articulation : la présence à de basses fréquences d'énergie acoustique quasi périodique indique la présence de voisement. Les segments de parole aperiodiques résultent de bruits de turbulence : non-voisement ou phonèmes fricatifs.

➤ Des informations prosodiques concernant l'intonation et l'accentuation.

➤ R. Plomp en 1988 a démontré que la diminution des contrastes d'enveloppe temporelle peut avoir des effets délétères sur l'intelligibilité.

➤ R. Drullman, J.M. Festen et R. Plomp ont montré, en 1994, que la dégradation des fluctuations d'amplitude comprises entre 4 et 16 Hz s'accompagne d'une dégradation significative de la compréhension de la parole, notamment des consonnes.

➤ Les résultats de compréhension avec un implant cochléaire mono électrode, les travaux de Van Tassel en 1987 et ceux de Shannon et al en 1995 prouvent que l'enveloppe temporelle est nécessaire, voire suffisante pour la compréhension de la parole.

Fort de l'observation de ces travaux, il a semblé judicieux à F. Lefèvre d'utiliser les caractéristiques de l'enveloppe temporelle pour régler les appareils auditifs. C'est ainsi qu'il a débuté en 2004, avec l'aide de quelques étudiants, le projet ATEC (Audiological Temporal Envelopes Comparison).

Deuxième chapitre : Rappels sur la mise en place de l'ATEC

2.1. Le répertoire d'enveloppes temporelles

La première étape du projet ATEC (Audiological Temporal Envelopes Comparison) fut d'extraire les enveloppes temporelles de la parole afin de pouvoir les étudier. Ceci se fit en quatre étapes : d'abord le choix du matériel phonétique, puis l'enregistrement des mots, l'extraction des enveloppes temporelles, et enfin, l'extraction des indices temporels pertinents.

2.1.1. Le choix des TSI (Tri Syllabes Identiques)

Les phonèmes sont souvent trop brefs pour être identifiés comme des événements sonores discrets. En ce qui concerne la parole, le premier niveau d'identification se fait au niveau d'unités supra phonétiques telles que la syllabe. C'est un élément clé de la reconstruction perceptive du signal de parole.

L'étude au niveau syllabique des enveloppes temporelles permet de prendre en compte les transitions des formants qui sont phonétiquement significatives et qu'on retrouve lors de l'association de deux phonèmes [3]. La syllabe est donc une véritable unité linguistique tant sur le plan de la production vocale que sur le plan de la perception.

Plusieurs raisons ont poussé F. Lefèvre à enregistrer un mot de trois syllabes identiques appelé Tri Syllabes Identiques :

- Il souhaitait étudier une syllabe entourée de deux autres pour prendre en compte les transitions formantiques.
- Il prévoyait de créer un test vocal qui ne permette pas au patient de deviner le mot. Les logatomes (mots sans signification) s'imposaient donc. Mais les tests de logatomes sont compliqués. C'est pourquoi, pour ne pas fatiguer et décourager les patients, il lui a semblé judicieux de permettre trois écoutes de la syllabe.

En ce qui concerne le matériel phonétique :

Pour faciliter l'étude, la liste des voyelles simplifiées a été utilisée, c'est-à-dire : /a/, /e/, /ø/, /i/, / \tilde{e} /, /o/, / \tilde{o} /, /u/, /y/, soit 10 voyelles sur les 16 du français. Les phonèmes {/œ/, / / et /ø/}, {/o/ et /ɔ/}, {/ \tilde{e} / et / \tilde{a} /}, {/e/ et / /} et {/a/ et /ɑ/} n'ont pas été différenciés, les différences spectrales n'étant pas suffisamment marquées [12]. Pour les consonnes, les phonèmes /p/, /t/, /k/, /b/, /d/, /g/, /f/, /s/, /ʃ/, /v/, /z/, /je/, /m/, /n/, /ɲ/, /r/, /l/ et /j/ ont été utilisés, soit 18 consonnes, le français en comportant 20.

Il résulte donc de cela 180 combinaisons de syllabes consonne-voyelle (ex : tatata).

2.1.2. L'extraction des enveloppes temporelles

Dans le cadre d'un travail préliminaire, l'enregistrement des 180 syllabes avait été réalisé par F. Lefèvre, E. Katona et S. Laurent [14]. Une séance d'enregistrement avait été réalisée en cabine insonorisée non réverbérante.

Après acquisition des 180 syllabes sous format WAV, elles ont été transformées en signaux sous forme de matrices pour être traitées et analysées par le logiciel Matlab pour l'établissement du répertoire [3].

Ensuite les enregistrements ont été découpés en six bandes de fréquence (50-200 Hz, 200-500 Hz, 0,5-1 kHz, 1-2 kHz, 2-3 kHz, 3-8 kHz) avec le logiciel Matlab. Ce découpage fréquentiel est stratégique par rapport à la répartition énergétique des indices acoustiques fréquentiels des différents sons de la parole.

- Le premier canal de 50 à 200 Hz, nous montre la présence éventuelle de voisement (le fondamental laryngé du locuteur étant en moyenne de 80 explosions laryngées par seconde).
- Le deuxième canal de 200 à 500 Hz, nous permet d'observer le 1^{er} formant de la plupart des voyelles [14].
- Le troisième canal de 500 Hz à 1 kHz, est caractéristique notamment des 1^{er} et 2^{ème} formants.
- Les quatrième et cinquième canaux, respectivement de 1 à 2 kHz et de 2 à 3 kHz, comprennent le deuxième formant et les bruits de friction.
- Le sixième canal de 3 à 8 kHz, peut aussi présenter les caractéristiques des bruits de friction.

Enfin, les enveloppes temporelles de chaque TSI (Tri Syllabe Identique) et de chaque bande de fréquence furent extraites par transformée de Hilbert.

2.1.3. Les indices temporels retenus

Voici les indices temporels calculés par Matlab sur chaque syllabe et dans chaque bande de fréquence.

➤ La valeur RMS (Root Mean Square) est la valeur efficace de la pression acoustique. Elle est obtenue en calculant la racine carrée de la moyenne des carrés des pressions acoustiques instantanées. L'analyse des valeurs RMS permet de déterminer les bandes de fréquence où l'amplitude globale des enveloppes temporelles est la plus importante.

➤ La pression de crête est la valeur maximale prise par la pression instantanée pendant la période de mesure. Elle permet de repérer les pics d'amplitude d'un signal.

➤ Le facteur de crête (FC) est le rapport entre cette pression maximale et la pression efficace [10]. Donc $FC = \text{Valeur Max} / \text{Valeur RMS}$

Cette relation peut aussi s'écrire $FC = L_{\text{max}} - L_{\text{RMS}}$

Où L_{max} (niveau max en dB) = $20 \log_{10} (\text{Valeur Max})$

Et L_{RMS} (niveau moyen en dB) = $20 \log_{10} (\text{Valeur RMS})$.

Le facteur de crête dans ce cas est donné en dB [10].

Le facteur de crête permet de caractériser l'amplitude des variations du signal. Un facteur de crête important caractérise une variation brutale d'amplitude du signal. Le facteur grandit avec la complexité du signal. [10]

➤ Le spectre de modulation : comme pour n'importe quel signal, l'enveloppe a un profil spécifique dans le temps. On peut donc la décomposer en une série de signaux sinusoïdaux tel que le définit le théorème de Fourier, décrivant ainsi son spectre de modulation (analyse du degré de modulation par rapport à la fréquence de modulation).

Avec le spectre de modulation, nous pouvons déterminer :

- La dynamique qui est la différence entre la valeur maximale de l'amplitude et sa valeur minimum.
- La profondeur de modulation définie par $(\max - \min) / (\max + \min)$.

➤ Les pentes : il s'agit du coefficient directeur de la tangente à l'enveloppe temporelle.

La pente permet d'apprécier l'évolution du signal dans le temps. Une pente importante positive caractérise une brusque montée du signal, alors qu'une pente faible positive caractérise une montée plus douce. La pente est négative lorsque le signal diminue. De la même façon, cette diminution est plus brutale lorsque la pente, en valeur absolue, est importante.

2.2. Le test syllabique

La deuxième étape de l’ATEC consista à créer un test de reconnaissance de syllabes afin d’étudier les confusions des patients et les aspects temporels de ces erreurs. Ce test fut appelé « le test syllabique » [2].

2.2.1. La conception des listes

Le test est composé de sept listes de 20 Tri Syllabes Identiques (chacune constituée de deux phonèmes), soit 40 phonèmes par liste.

Chaque liste commence et se termine par des syllabes plus faciles afin de ne pas inquiéter le patient. De même, afin de ne pas dérouter les patients, les syllabes sont agencées de façon à ce que deux syllabes trop proches phonétiquement ne se jouxtent pas.

Pour que les listes donnent des résultats comparables, F. Lefèvre a tenu à garder une homogénéité autant sur le plan phonétique que sur le plan syllabique. Ainsi dans chaque liste, les dix voyelles sont répétées deux fois, dix consonnes ne sont prononcées qu’une fois et cinq consonnes sont répétées deux fois.

Dans l’ensemble des sept listes, chaque syllabe n’est émise qu’une fois.

2.2.2. La validation du test syllabique

2.2.2.1. Egalisation en difficulté

Après quelques modifications, A. Arrigoni [2] a pu vérifier que les sept listes étaient bien égalisées en difficulté, avec une marge d'erreur de 3%. Il a aussi vérifié que plus le patient fait d'erreurs, plus la variabilité entre les listes est importante.

2.2.2.2. Comparaison aux autres tests vocaux

En 2005, P. Lemesle [16] a comparé le test syllabique au test cochléaire de Lafon, à l'audiométrie verbo-fréquentielle de L. et D. Dodelé et à l'Audivox de J. Warble. Il en ressort que le test syllabique n'est pas plus reproductible que les autres tests vocaux mais qu'il est plus sensible.

2.2.2.3. Egalisation en intensité ou non

Il est habituel, depuis la création des tests vocaux d'égaliser les mots en intensité afin qu'un mot ne soit pas entendu moins fort que les autres. En 2006, A. Adam [1] a vérifié l'enjeu de l'égalisation en intensité des différents logatomes d'une liste. Elle a donc créé deux versions enregistrées du test : une version où les TSI étaient égalisées en intensité à partir de la valeur RMS et une autre version non égalisée.

Il en résultait que les deux versions donnaient des résultats similaires.

F. Lefèvre préférant préserver les différences naturelles entre syllabes, le test syllabique n'est pas égalisé en intensité.

2.3. La création du logiciel

La troisième étape de l'ATEC, effectuée par P. Souêtre [21], fut la programmation d'un logiciel calculant automatiquement les erreurs d'enveloppes temporelles faites par les patients à partir de leurs confusions phonétiques.

2.3.1. Le cahier des charges

Le logiciel devait pouvoir regrouper les résultats du test syllabique et les calculs des enveloppes temporelles. Voici le cahier des charges de l'ATEC :

2.3.1.1. Le test syllabique :

- Les sept listes du test syllabique doivent pouvoir être utilisées.
- Un repère visuel doit indiquer en permanence l'état d'avancement du test ; celui-ci pouvant être actionné à tout moment par le testeur ou le patient.
- Les consonnes et les voyelles correctes sont préinscrites de façon à minimiser la saisie.
- Une absence de réponse est notée « x » dans la case correspondante.
- Un codage doit être déterminé pour les phonèmes n'ayant pas d'équivalent en touche clavier, il doit être le plus intuitif possible.
- Doivent apparaître :
 - Le nombre total de phonèmes erronés.
 - Le pourcentage de phonèmes reconnus.
 - Le nombre total et pourcentage d'erreur sur les consonnes perçues.
 - Le nombre total et pourcentage d'erreur sur les voyelles perçues.

2.3.1.2. La comparaison des enveloppes temporelles

- Tous les calculs comparatifs doivent être automatiques, sans saisie autre que celle des confusions notées au cours du test syllabique.
- A la saisie de chaque consonne ou voyelle erronée, l'écart relatif entre syllabe émise et syllabe perçue doit être calculé.
- L'écart concerne les quatre critères retenus : le facteur de crête, la profondeur de modulation, la dynamique et la valeur RMS.
- L'écart doit être calculé pour l'enveloppe globale et pour chacun des six canaux définis lors de la constitution du répertoire.
- Pour chaque liste du test syllabique, à chaque erreur du patient, une incrémentation des surévaluations et des sous-évaluations d'enveloppe temporelle doit être réalisée.
- Pour chaque liste du test syllabique, une somme totale des surévaluations et une somme totale des sous-évaluations doivent être réalisées.
- Les résultats de la comparaison doivent pouvoir être lus rapidement.
- Un document synthétique, imprimable, reprenant les résultats obtenus sur toutes les listes doit être également disponible.

2.3.2. Mode d'emploi et présentation du logiciel

Pour mieux suivre ce paragraphe, il est conseillé d'ouvrir le logiciel « ATEC définitif » (provisoirement « définitif ») du CD fourni avec ce mémoire.

L'emploi du logiciel est très simple, en accord avec les exigences du cahier des charges, les seules manipulations de l'utilisateur sont l'activation des sons numérisés, la saisie clavier des phonèmes perçus lors de la passation du test syllabique et le clic souris pour accéder aux différentes listes du test syllabique.

2.3.2.1. Le test syllabique

A l'ouverture du logiciel, la liste 1 s'affiche automatiquement, le choix des autres listes se fait par sélection des onglets en bas du document. Les onglets permettent également d'accéder au document de synthèse imprimable, à la base de données et au tableau de correspondance.

Les sept listes du test syllabique sont construites sur le même modèle, la partie gauche de chaque document est consacrée au test syllabique, la partie droite à la comparaison des enveloppes temporelles.

On débute le test en cliquant sur le bouton correspondant au premier phonème dans la colonne SON, puis en cas de mauvaise réponse, on saisit séparément la consonne dans la colonne Co, la voyelle dans la colonne Vo en respectant le code phonémique choisi (voir en annexe le nouveau code). On saisit x en l'absence total de réponse. En cas de bonne réponse, aucune saisie n'est nécessaire, le test est pré-rempli de façon correcte. Une saisie est validée par la touche ENTER ou la sélection par un clic souris de la case située juste en dessous.

On poursuit le test en sélectionnant le bouton SON correspondant à la deuxième syllabe et ainsi de suite.

Lorsque le bouton SON vient d'être activé, un point noir, servant de repère, apparaît sur celui-ci.

La colonne SE correspond à la syllabe émise, la colonne PP correspond au phonème perçu, aucune saisie ne doit y être effectuée. Une couleur spécifique apparaît lorsqu'une erreur est commise sur le phonème perçu.

La double colonne ERR correspond aux erreurs commises par le patient, la colonne de gauche correspond au nombre d'erreurs commises sur la consonne, la colonne de droite au nombre d'erreurs commises sur la voyelle. Aucune saisie ne doit y être effectuée.

A la fin du test un ensemble de résultats apparaît :

- % PR : pourcentage de phonème reconnus
- Ph err : nombre de phonème erronés
- En bas de la double colonne ERR, nombre et pourcentage d'erreurs sur les consonnes à gauche, nombre et pourcentage d'erreurs sur les voyelles à droite.

2.3.2.2. Comparaison des enveloppes temporelles

La lecture des résultats de comparaison d'enveloppe se fait sur le coté droit du document ouvert, aucune saisie ne doit être effectuée.

Les résultats concernent les quatre critères de comparaison retenus : le facteur de crête, la profondeur de modulation, la dynamique, la valeur RMS.

Pour chacun d'eux, les résultats des écarts relatifs (positif, négatif) entre syllabes émises et syllabes perçues sont indiqués sous forme graphique et sous forme de tableaux, en pourcentage ou en dB. Ils sont indiqués pour l'enveloppe globale et pour chacun des six canaux.

Sous le test syllabique et les comparaisons d'enveloppe temporelle, quatre tableaux (FC, PMOD, DYN et RMS) indiquent le détail des écarts relatifs pour chaque syllabe testée dans chacun des canaux de C1 à C6. Les écarts relatifs cumulés positifs et négatifs qui y apparaissent, permettent l'établissement des graphiques représentés, aucune saisie ne doit y être effectuée.

Un document de synthèse imprimable reprend l'ensemble des résultats obtenus.

A la fermeture du logiciel, il ne faut pas oublier d'enregistrer les résultats sous un nouveau nom. Ceci permet lors de la prochaine ouverture de l'ATEC de maintenir correctement pré-rempli les résultats du test syllabique.

Remarque sur la base de données : la base de données représente un grand nombre de valeurs numériques. Une représentation graphique accessible dans la partie basse du document permet de comparer, par groupe de cinq syllabes, les valeurs des quatre critères retenus (en les saisissant selon le code retenu pour la saisie des phonèmes).

2.4. La modification de la base de données

C. Château a calculé son répertoire d'enveloppe temporelle à partir d'un seul locuteur. Mais chaque locuteur a une prononciation particulière. G. Lochon [17] a souhaité étudier ces différences de prononciation à travers les enveloppes temporelles.

Il a demandé à 69 locuteurs de prononcer une fois 180 tri syllabes et à un homme de les prononcer 13 fois dans différentes conditions. L'âge moyen des personnes enregistrées est de 29 ans, mais il varie de 4 à 86 ans. 34 hommes et 36 femmes ont accepté d'être enregistrés dans les mêmes conditions que celles utilisées par C. Château.

Ensuite il a effectué les mêmes calculs que C. Château mais pour les 14300 syllabes enregistrées. Chaque syllabe a donc été comparée 72 fois.

A partir de ces données, il a pu créer une nouvelle base de données utilisée pour ce mémoire.

Il a aussi recherché des invariants inter-locuteurs et intra-locuteurs sur l'enveloppe temporelle. Ses recherches ne sont pas encore finalisées à la date de rédaction de ce mémoire.

Depuis les travaux de P. Souêtre, le logiciel ATEC a donc été modifié : la base de données, la présentation et le nombre de paramètres étudiés ont évolué. Il nous a notamment semblé judicieux de rajouter l'analyse des traits acoustiques des confusions phonétiques. De plus, la pratique de l'audioprothèse s'effectuant de plus en plus en collaboration avec les orthophonistes, nous avons souhaité ajouter l'analyse des traits articulatoires. Ceci permettra d'obtenir pour la première fois, un outil de travail commun aux audioprothésistes et aux orthophonistes.

Troisième chapitre : Intégration des traits articulatoires et acoustiques à l'ATEC

3.1. Rappels de phonétique acoustique

Nous avons vu, dans le premier chapitre de cet exposé, les classifications acoustiques des sons de la parole. Nous ne ferons ici que l'inventaire des traits acoustiques de chaque phonème. [13]

3.1.1. Les voyelles

Toutes les voyelles du français sont sonores, continues et vocaliques. Voici la liste des autres traits acoustiques des voyelles :

Le /a/ est oral, compact, grave

Le /o/ est oral, diffus, grave

Le / / est oral, diffus, aigu

Le /e/ est oral, diffus, aigu

Le /ø/ est oral, diffus, aigu

Le /u/ est oral, diffus, grave

Le /y/ est oral, diffus, aigu

Le /i/ est oral, diffus, aigu

Le /ã/ est nasal, compact, grave

Le /õ/ est nasal, diffus, grave

Le /ẽ/ est nasal, diffus, aigu

3.1.2. Les consonnes

Voici les traits acoustiques des consonnes utilisés dans l'ATEC :

/p/ : oral, diffus, grave, interrompu, sourd, non vocalique

/t/ : oral, diffus, aigu, interrompu, sourd, non vocalique

/k/ : oral, compact, aigu, interrompu, sourd, non vocalique (mais diffus et grave s'il est suivi de /o/, /u/ ou /ɔ/)

/b/ : oral, diffus, grave, interrompu, sonore, non vocalique

/d/ : oral, diffus, aigu, interrompu, sonore, non vocalique

/g/ : oral, compact, aigu, interrompu, sonore, non vocalique (mais diffus et grave s'il est suivi de /o/, /u/ ou /ɔ/)

/f/ : oral, diffus, grave, continu, sourd, non vocalique

/s/ : oral, diffus, aigu, continu, sourd, non vocalique

/ʃ/ : oral, compact, aigu, continu, sourd, non vocalique

/v/ : oral, diffus, grave, continu, sonore, non vocalique

/z/ : oral, diffus, aigu, continu, sonore, non vocalique

/ʒ/ : oral, compact, aigu, continu, sonore, non vocalique

/l/ : oral, diffus, aigu, continu, sonore, vocalique

/m/ : nasal, diffus, grave, continu, sonore, vocalique

/n/ : nasal, diffus, aigu, continu, sonore, vocalique

/r/ : oral, compact, grave, continu, sonore, vocalique

/ŋ/ : nasal, compact, aigu, continu, sonore, vocalique

/j/ : oral, compact, aigu, continu, sonore, vocalique

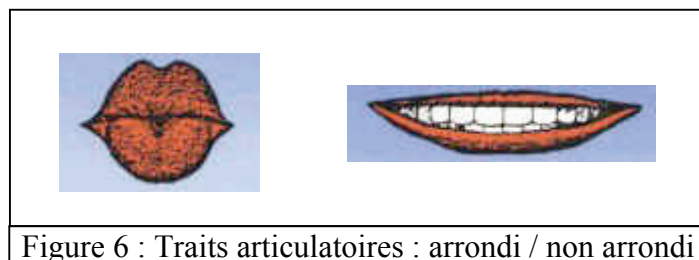
3.2. Rappels de phonétique articulatoire

Jusqu'à présent nous avons étudié l'aspect acoustique des phonèmes ; aspect le plus intéressant pour les audioprothésistes. Les orthophonistes travaillent plus sur l'articulation des phonèmes. C'est pour cette raison que les traits articulatoires ont été intégrés à l'ATEC. Dans cette classification, et contrairement aux traits acoustiques, les voyelles et les consonnes ne sont pas caractérisés par les mêmes traits articulatoires. Il existe plusieurs classifications. Voici celle que m'ont proposée G. Bescond et G. Guillarm

3.2.1. Les voyelles

Les voyelles se caractérisent essentiellement par le libre écoulement de l'air, sans obstacle dans le conduit vocal. Leur timbre dépend de la forme et du volume des cavités supra-glottiques. Six traits caractérisent les voyelles du français [25]:

- **La position du voile du palais** (oral/nasal) : ce trait est identique à la classification acoustique (voir p14).
- **La forme des lèvres** (arrondi/non arrondi) : pour les voyelles arrondies, les lèvres sont arrondies et projetées en avant. Pour les voyelles non arrondies, les lèvres sont écartées ou dans une position neutre.



- **L'aperture** (fermé/ouvert) : si la langue s'élève, entraînant un rétrécissement de la cavité buccale, on parle de voyelle fermée. Pour les voyelles ouvertes au contraire, la langue est au repos ou peu élevée et on observe une ouverture de la cavité buccale. Il existe une position intermédiaire pour les voyelles mi-fermées.

- **Le lieu d'articulation** (antérieur/postérieur) : une voyelle est antérieure lorsque l'apex de la langue se déplace vers l'avant de la bouche. Si elle se déplace vers l'arrière, on parle de voyelle postérieure.

- **La fréquence** (aigu/grave) : ce trait est identique à la classification acoustique (voir p13).

- **La tension** : en fonction de la tension mise dans les muscles de l'appareil phonatoire, on parle de voyelle plus ou moins tendue.

Voici le tableau récapitulatif des traits articulatoires des voyelles :

	Position du voile du palais	Aperture	Lieu d'articulation	La forme des lèvres	Fréquence	Tension
i	Oral	Fermé	Antérieur	Non arrondi	Aigu	++
y	Oral	Fermé	Antérieur	Arrondi	Aigu	++
u	Oral	Fermé	Postérieur	Arrondi	Grave	++
e	Oral	Mi fermé	Antérieur	Non arrondi	Aigu	+
ø	Oral	Mi fermé	Antérieur	Arrondi	Aigu	+
o	Oral	Mi fermé	Postérieur	Arrondi	Grave	+
a	Oral	Ouvert	Antérieur	Non arrondi	Grave	--
ẽ	Nasal	Mi fermé	Antérieur	Non arrondi	Aigu	-
õ	Nasal	Mi fermé	Postérieur	Arrondi	Grave	-
ã	Nasal	Ouvert	Postérieur	Non arrondi	Grave	--

Figure 7 : Traits articulatoires des voyelles

3.2.2. Les consonnes

Les consonnes sont caractérisées par un obstacle sur le passage du flux d'air. Le lieu d'articulation est donc ce qui les représente le mieux. Voici les traits articulatoires des consonnes [25]:

- **Le mode d'articulation** (occlusif/constrictif) : équivalent de continu et interrompu (voir p14).

- **La position du voile du palais** (oral/nasal) : ce trait est identique à la classification acoustique (voir p14).

- **La vibration des cordes vocales** (voisé/non voisé) : ce trait est identique à la classification acoustique (voir p14).

- **Le lieu d'articulation** : c'est l'endroit où se trouve, dans la cavité buccale, l'obstacle au passage de l'air. Le lieu d'articulation peut se situer aux endroits suivants :
 - Les lèvres (articulations labiales ou bilabiales)
 - Les lèvres et les dents (articulations labio dentales)
 - Les dents et les alvéoles (articulations dental alvéolaires)
 - L'arrière des alvéoles (articulations post alvéolaires)
 - Le palais (articulations palatales)
 - Le voile du palais (articulations vélaires)

Voici le tableau récapitulatif des traits articulatoires des consonnes :

	Mode d'articulation	Position du voile du palais	Vibration des cordes vocales	Lieu d'articulation
p	Occlusif	Oral	non voisé	Bilabial
t	Occlusif	Oral	non voisé	Dental alvéolaire
k	Occlusif	Oral	non voisé	Vélaire
b	Occlusif	Oral	Voisé	Bilabial
d	Occlusif	Oral	Voisé	Dental alvéolaire
g	Occlusif	Oral	Voisé	Vélaire
f	Constrictif	Oral	non voisé	Labio dental
s	Constrictif	Oral	non voisé	Dental alvéolaire
ʃ	Constrictif	Oral	non voisé	Post alvéolaire
v	Constrictif	Oral	Voisé	Labio dental
z	Constrictif	Oral	Voisé	Dental alvéolaire
ʒ	Constrictif	Oral	Voisé	Post alvéolaire
m	Occlusif	Nasal	Voisé	Bilabial
n	Occlusif	Nasal	Voisé	Dental alvéolaire
ɲ	Occlusif	Nasal	Voisé	Palatal
r		Oral	Voisé	Dental alvéolaire
l		Oral	Voisé	Dental alvéolaire
j	Constrictif	Oral	Voisé	Palatal

Figure 8 : Traits articulatoires des consonnes

3.3. Intégration des traits à l'ATEC

3.3.1. Programmation

A partir des classements que nous venons d'étudier, le logiciel ATEC a été programmé de façon à calculer automatiquement les erreurs de traits acoustiques et de traits articulatoires.

Dans un tableau (rendu invisible), le logiciel compare les traits du phonème émis avec ceux du mot répété par le patient, en se reportant à la base de données. A chaque fois qu'il y a une différence entre les deux syllabes, l'ATEC incrémente le trait erroné d'une erreur. Ensuite il calcule le nombre total d'erreurs pour chaque trait. Enfin, le logiciel calcule pour chaque trait le pourcentage du nombre total d'erreurs dans la liste par rapport au nombre de fois où le trait devrait apparaître si la liste n'était pas erronée. Pour une visualisation plus rapide, ce pourcentage est repris dans un tableau récapitulatif et par des histogrammes.

Pour plus de clarté, voici un exemple de calcul sur les traits acoustiques.

Voici la liste émise :

SAISIE			reset liste		
jee	je	e	<input checked="" type="radio"/> gé	0	0
ho	h	o	<input type="radio"/> chau	0	0
ti	t	i	<input type="radio"/> ti	0	0
fâ	f	â	<input type="radio"/> fan	0	0
pin	p	in	<input type="radio"/> pain	0	0
vu	v	u	<input type="radio"/> vou	0	0
sa	s	a	<input type="radio"/> sa	0	0
d&	d	&	<input type="radio"/> deu	0	0
bon	b	on	<input type="radio"/> bon	0	0
ly	l	y	<input type="radio"/> lu	0	0
mi	m	i	<input type="radio"/> mi	0	0
ku	k	u	<input type="radio"/> cou	0	0
zo	z	o	<input type="radio"/> zo	0	0
nin	n	in	<input type="radio"/> nain	0	0
ge	g	e	<input type="radio"/> gué	0	0
py	p	y	<input type="radio"/> pu	0	0
gâ	g	â	<input type="radio"/> gan	0	0
s&	s	&	<input type="radio"/> ceu	0	0
von	v	on	<input type="radio"/> von	0	0
ma	m	a	<input type="radio"/> ma	0	0

Figure 10 : Liste enregistrée

Le patient a compris :

SAISIE			reset liste		
jee	je	e	<input checked="" type="radio"/> gé	0	0
ho	h	o	<input type="radio"/> chau	0	0
pi	p	i	<input type="radio"/> ti	1	0
fâ	f	â	<input type="radio"/> fan	0	0
pin	p	in	<input type="radio"/> pain	0	0
vu	v	u	<input type="radio"/> vou	0	0
sa	s	a	<input type="radio"/> sa	0	0
d&	d	&	<input type="radio"/> deu	0	0
bon	b	on	<input type="radio"/> bon	0	0
ly	l	y	<input type="radio"/> lu	0	0
mi	m	i	<input type="radio"/> mi	0	0
ku	k	u	<input type="radio"/> cou	0	0
zo	z	o	<input type="radio"/> zo	0	0
nin	n	in	<input type="radio"/> nain	0	0
ge	g	e	<input type="radio"/> gué	0	0
py	p	y	<input type="radio"/> pu	0	0
gâ	g	â	<input type="radio"/> gan	0	0
s&	s	&	<input type="radio"/> ceu	0	0
von	v	on	<input type="radio"/> von	0	0
ma	m	a	<input type="radio"/> ma	0	0

Figure 9 : Liste erronée

Entre /ti/ et /pi/, il n'y qu'un trait erroné : /ti/ est aigu alors que /pi/ est grave. Le patient a donc fait une erreur sur le trait aigu de la troisième syllabe de la liste.

Dans toute la liste il y a 18 phonèmes caractérisés par le trait aigu. Or $1/18 = 5\%$. Le patient a donc fait 5% d'erreurs dans cette liste sur le trait acoustique aigu. D'où le tableau :

Nr syll	G	A	K	D	O	N	V	T	C	I	S	R
1												
2												
3		1.0										
4												
5												
6												
7												
8												
9												
10												
11												
12												
13												
14												
15												
16												
17												
18												
19												
20												
	G	A	K	D	O	N	V	T	C	I	S	R
%	0%	5%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0

- G** : Grave
- A** : Aigu
- K** : compact
- D** : Diffus
- O** : Oral
- N** : Nasal
- V** : Vocalique
- T** : Non vocalique
- C** : Continu
- I** : Interrompu
- S** : Sourd
- R** : Sonore

Figure 11 : Tableau de calcul d'erreurs pour les traits acoustiques

Ensuite, ce résultat est repris dans un tableau récapitulatif et par un histogramme :

TRAITS ACOUSTIQUES	Grave	0%
	Aigu	5%
	Compact	0%
	Diffus	0%
	Oral	0%
	Nasal	0%
	Vocal	0%
	Non Vocal	0%
	Continu	0%
	Interrompu	0%
	Sourd	0%
	Sonore	0%

Figure 13 : Tableau récapitulatif des erreurs de traits acoustiques

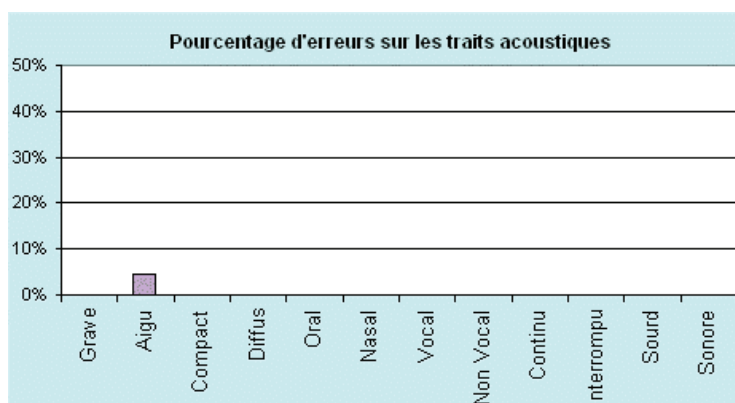


Figure 12 : Histogramme récapitulatif des erreurs de traits acoustiques

3.3.2. Mode d'emploi de l'ATEC v1 4

Pour mieux suivre ce paragraphe, il est conseillé d'ouvrir le logiciel ATEC_v1_4 du CD fourni avec ce mémoire.

Le logiciel s'ouvre automatiquement sur la première liste. On accède aux autres listes par un clic sur les onglets en bas de page. En haut à gauche des feuilles, le numéro de la liste est indiqué.

Pour toutes les listes, un cadre a été ajouté. On peut y noter les conditions de test (par exemple : OD, ODG, bruit, oreille appareillée, le 26/10/2007). Si on veut inscrire plusieurs lignes, il faut faire ALT + ENTER.

3.3.2.1. Le test syllabique

Comme pour les versions précédentes, les listes du test syllabique sont déjà inscrites.

Pour envoyer le son, cliquer sur le petit rond à droite des cases blanches (une main apparaît à la place de la flèche de la souris) (figures 12 et 13 p41).

Si le patient fait une erreur, remplacer le bon phonème par celui compris par le sujet dans la case blanche correspondante, avec le code ATEC. Si le logiciel ne reconnaît pas le phonème inscrit, un message d'erreur apparaît. Il est important de respecter ce code pour que le logiciel calcule correctement les erreurs.

Pour valider un phonème, on peut appuyer sur la touche ENTER, sur une des flèches du clavier ou cliquer dans une autre case. Seules les cases blanches peuvent être modifiées.

Les cases bleues servent pour les calculs. De gauche à droite :

- La première colonne bleue correspond à la syllabe à comprendre.
- La deuxième colonne bleue correspond à la syllabe comprise. Si elle est erronée, elle devient bleue claire.
- La troisième colonne bleue est remplie d'un 0 si la consonne est bien comprise, et d'un 1 si elle est erronée.
- La quatrième colonne bleue est remplie d'un 0 si la voyelle est bien comprise, et d'un 1 si elle est erronée.

Juste sous les listes, on trouve les résultats du test syllabique : le pourcentage de phonèmes reconnus (%PR), le nombre de phonèmes erronés (Ph err), le nombre et le pourcentage de consonnes et de voyelles erronées.

3.3.2.2. La comparaison des enveloppes temporelles

Les erreurs, sur les quatre caractéristiques des enveloppes temporelles, sont visibles sous la forme de quatre histogrammes sur le côté droit du test syllabique. Plus à droite, on peut visualiser les pourcentages exacts d'erreurs dans quatre tableaux. Enfin, tout à fait en dessous des graphiques des traits acoustiques et articulatoires, quatre tableaux détaillent les erreurs pour chaque syllabe.

3.3.2.3. Les traits acoustiques et articulatoires

Sous les listes, les uns sous les autres, figurent trois graphiques représentant les erreurs de traits acoustiques, de traits articulatoires des consonnes et de traits articulatoires des voyelles. Pour chacun d'eux, à droite on peut voir un histogramme résumé et un tableau comprenant les pourcentages exacts d'erreur.

Enfin, tout en bas de la page, deux grands tableaux détaillent les erreurs pour chaque syllabe.

3.3.2.4. Les autres feuilles

La feuille « synthèse » : on peut y noter le nom du patient et du testeur. Les résultats des sept listes et leurs conditions de test sont repris sous forme graphique mais aussi sous forme de tableau. Cela permet de les comparer. Pour le dossier papier, deux feuilles de graphique sont imprimables. Il suffit d'appuyer sur le bouton « imprimer les graphiques ».

La feuille « test syllabique » : il est possible d'imprimer les sept listes du test syllabique pour pouvoir travailler sur papier.

La feuille « base de données » : les bases de données sont protégées. Il est toutefois possible de comparer les enveloppes temporelles de cinq syllabes à l'aide des graphiques situés en milieu de page. Il suffit pour cela d'entrer les syllabes dans les tableaux avec le code ATEC. La base de données des enveloppes temporelles utilisée dans cette version de l'ATEC est celle calculée par G. Lochon. [17]

3.3.3. Les améliorations à effectuer

Il serait intéressant de pouvoir comparer les résultats des sept listes entre elles, ainsi que ceux d'une liste à différentes dates.

Depuis l'ajout des traits acoustiques et des traits articulatoires, l'ATEC est moins lisible. Peut être serait-il possible d'accéder aux résultats seulement sur demande. C'est-à-dire qu'à l'ouverture, seules les listes apparaîtraient. Pour consulter les résultats, des boutons permettraient d'ouvrir la page des enveloppes temporelles, des traits acoustiques ou encore des traits articulatoires.

Pour ces modifications, Excel ne semble plus convenir. Il serait sûrement préférable de créer un logiciel différent avec l'aide d'un informaticien.

Quatrième chapitre : Etude de la reproductibilité de l'ATEC

A. Arrigoni a démontré que le test syllabique est reproductible d'une liste à l'autre [2]. En est-il de même pour l'analyse des enveloppes temporelles et des traits acoustiques et articulatoires ? Est-ce que les sept listes, testées dans les mêmes conditions, le même jour, par le même patient, donnent des résultats identiques ?

4.1. Conditions du test

4.1.1. Population étudiée

26 patients (dont cinq implantés cochléaires) ont accepté de participer à ce test. Ils sont âgés de 62 ans en moyenne (entre 21 et 88 ans).

Le type et le degré de surdité n'importent pas ici. Mais pour que les résultats soient intéressants, il faut que les patients fassent des confusions. Par contre, pour ne pas les fatiguer, le test est fait à intensité confortable. Il est donc important que les patients fassent des confusions même à intensité maximale non désagréable.

4.1.2. Matériel utilisé

Une seule oreille, non appareillée, est testée. Cela permet d'utiliser le casque. Pour les implantés cochléaires, les listes sont envoyées en champ libre.

Nous utilisons donc le module audiogramme du logiciel Aurical (pour régler l'intensité de test), le logiciel ATEC, un audiomètre (Aurical) et un casque ou un haut parleur.

4.1.3. Déroulement des tests

La première étape consistait à trouver l'intensité de test. Pour cela, l'intensité d'une tri syllabe était augmentée jusqu'à l'obtention de l'intensité la plus importante qui ne soit pas désagréable pour le malentendant.

➡ Intensité moyenne sur tous les patients : 89,06 dB SPL

➡ Intensité maximale : 120 dB SPL

➡ Intensité minimale : 65 dB SPL

En revanche, l'intensité choisie pour tester les implantés cochléaires était celle du spectre à long terme de la parole, soit 65 dB SPL.

Ensuite les sept listes étaient testées, avec une pause si nécessaire.

La liste de début de test était différente à chaque patient pour ne pas avoir à tenir compte de la fatigue.

Voici le nombre moyen de phonèmes erronés et le pourcentage de consonnes et de voyelles erronées pour les malentendants et pour les implantés cochléaires :

	Malentendants	Implantés cochléaires
Nb de phonèmes erronés	10,47	26,46
% Consonnes erronées	31,97	66,14
% voyelles erronées	20,37	66,24

Figure 14 : Résultats du test phonétique pour la reproductibilité de l'ATEC

On peut remarquer que les malentendants font plus d'erreurs sur les consonnes que sur les voyelles. Les implantés cochléaires font, quant à eux, autant d'erreur de voyelles que de consonnes. Ce dernier résultat est un peu étonnant compte tenu des résultats de M. Ganthier [8] obtenus sur un échantillon plus large d'implantés cochléaires.

4.2. Analyses statistiques

L'analyse statistique s'est effectuée à l'aide du logiciel de calcul EXCEL.

Pour chaque caractéristique d'enveloppe temporelle et pour chaque patient, EXCEL a calculé la moyenne (M_i) des sept listes et l'écart type entre les sept listes (E_i) des surévaluations et des sous-évaluations.

L'écart type permet de comparer les listes entre elles mais il dépend de la moyenne. Le coefficient de variation (écart type/moyenne) est donc plus fiable [22]. Mais les valeurs de moyenne (M_i) que l'on obtient par personne peuvent être très proches de 0. Dans ce cas le coefficient de variation ($V_i = E_i/M_i$) donne des résultats aberrants.

Il a donc été décidé de faire la moyenne (M et E) de toutes les moyennes (M_i) et de tous les écarts types (E_i) et de calculer les coefficients de variation ($V = E/M$) à partir de ces dernières moyennes.

Le tableau suivant reprend le principe des calculs effectués :

	Patient 1	Patient 2	Patient 3	Total
Moyenne	M1	M2	M3	$M = (M1+M2+M3)/3$
Ecart type	E1	E2	E3	$E = (E1+E2+E3)/3$
Coefficient de variation				$V = E/M$

Figure 15 : Explication des calculs du coefficient de variation

4.3. Résultats sur les enveloppes temporelles

4.3.1. Reproductibilité des résultats entre les sept listes

Voici les coefficients de variation obtenus :

Surévaluation des enveloppes temporelles			Sous-évaluation des enveloppes temporelles		
FC	Global	65,28%	FC	Global	66,17%
50-200 Hz		62,26%	50-200 Hz		77,10%
200-500 Hz		62,58%	200-500 Hz		72,08%
0,5-1 KHz		60,45%	0,5-1 KHz		62,25%
1-2 KHz		57,06%	1-2 KHz		57,59%
2-3 KHz		62,58%	2-3 KHz		71,36%
3-8 KHz		67,26%	3-8 KHz		79,14%
PMOD			PMOD		
Global		73,95%	Global		74,10%
50-200 Hz		81,66%	50-200 Hz		93,16%
200-500 Hz		81,13%	200-500 Hz		99,06%
0,5-1 KHz		72,54%	0,5-1 KHz		97,05%
1-2 KHz		68,59%	1-2 KHz		71,69%
2-3 KHz		63,36%	2-3 KHz		78,84%
3-8 KHz		62,06%	3-8 KHz		79,85%
DYN			DYN		
Global		67,68%	Global		85,36%
50-200 Hz		73,88%	50-200 Hz		99,27%
200-500 Hz		62,14%	200-500 Hz		103,45%
0,5-1 KHz		65,69%	0,5-1 KHz		90,18%
1-2 KHz		65,75%	1-2 KHz		66,82%
2-3 KHz		64,93%	2-3 KHz		73,26%
3-8 KHz		60,88%	3-8 KHz		71,80%
RMS			RMS		
Global		78,65%	Global		90,81%
50-200 Hz		74,37%	50-200 Hz		73,59%
200-500 Hz		72,75%	200-500 Hz		89,66%
0,5-1 KHz		70,92%	0,5-1 KHz		86,85%
1-2 KHz		60,55%	1-2 KHz		76,35%
2-3 KHz		58,64%	2-3 KHz		73,09%
3-8 KHz		54,31%	3-8 KHz		73,72%

Figure 16 : Coefficients de variation des paramètres d'enveloppe temporelle des sept listes.

On peut remarquer que les coefficients de variation sont très importants avec une moyenne de :

- ➡ 66,85% en surévaluation
- ➡ 79,77% en sous-évaluation
- ➡ 73,31% au total sur les enveloppes temporelles.

Les sept listes ne sont donc pas reproductibles en ce qui concerne les enveloppes temporelles.

A. Arrigoni a déjà modifié les listes de façon à ce qu'elles soient reproductibles en nombre d'erreur [2]. L'équilibre étant fragile, il est difficile de réagencer les 140 TSI.

La reproductibilité serait certainement meilleure, en combinant deux listes, c'est-à-dire en créant trois listes de 40 TSI (au lieu de sept listes de 20 TSI).

Cela permettrait de garder l'agencement primaire des listes (donc l'équilibre syllabique), tout en augmentant le nombre d'item. Or, plus il y a de mots dans une liste, plus les différences entre listes s'amenuisent.

Les résultats des sept listes ont d'abord été comparés, pour savoir quelles étaient leurs difficultés respectives. Les listes 1, 2 et 3 sont les plus difficiles, alors que les listes 5, 6 et 7 sont plus faciles, la liste 4 est centrale.

Des combinaisons, entre les 3 premières et les trois dernières listes, ont donc été effectuées, afin de trouver les plus petits coefficients de variation entre les trois nouvelles listes :

- ➡ Combinaison 1 (C1) : L1-L5, L2-L7, L3-L6
- ➡ Combinaison 2 (C2) : L1-L6, L2-L5, L3-L7
- ➡ Combinaison 3 (C3) : L1-L7, L2-L6, L3-L5
- ➡ Combinaison 4 (C4) : L1-L5, L2-L6, L3-L7
- ➡ Combinaison 5 (C5) : L1-L6, L2-L7, L3-L5
- ➡ Combinaison 6 (C6) : L1-L7, L2-L5, L3-L6

Voici les résultats obtenus (voir les détails en annexe 2 p87-88):

	C1	C2	C3	C4	C5	C6
moyenne Facteur de crête	30,18%	31,90%	32,89%	30,79%	31,52%	33,25%
moyenne Profondeur de modulation	33,59%	36,23%	38,84%	33,97%	36,99%	37,76%
moyenne Dynamique	33,70%	32,00%	35,45%	28,73%	34,14%	38,11%
moyenne Valeur RMS	35,15%	31,01%	26,41%	34,20%	28,17%	29,82%
Total surévaluation	33,16%	32,79%	33,40%	31,92%	32,70%	34,73%
moyenne Facteur de crête	28,31%	25,78%	30,38%	28,34%	28,48%	27,46%
moyenne Profondeur de modulation	32,03%	30,56%	32,85%	33,98%	31,30%	29,77%
moyenne Dynamique	35,01%	31,42%	33,23%	33,31%	34,54%	31,70%
moyenne Valeur RMS	35,15%	31,01%	26,41%	34,20%	28,17%	29,82%
Total sous évaluation	35,49%	30,22%	33,47%	34,41%	31,32%	33,18%
TOTAL enveloppes temporelles	34,32%	31,50%	33,43%	33,17%	32,01%	33,96%

Figure 17 : Coefficients de variation des paramètres d'enveloppe temporelle des combinaisons de deux listes.

La combinaison 4 est la plus reproductible pour la surévaluation des enveloppes temporelles. Par contre, pour la sous-évaluation elle est détrônée par la deuxième combinaison. Au final, c'est aussi cette dernière qui donne les meilleurs résultats de reproductibilité. La combinaison la plus reproductible est donc : L1-L6, L2-L5 et L3-L7.

Voici les trois nouvelles listes :

Liste 1		Liste 2		Liste 3	
gé	jou	cha	pa	ché	ba
chau	bé	bain	té	bou	chou
ti	quin	qui	si	ni	fin
fan	chi	dou	zain	tain	vi
pain	mu	van	lon	zeu	pau
vou	za	mau	tou	pan	neu
sa	peu	nu	beu	kau	ton
deu	gau	pon	fu	son	sé
bon	non	gueu	vau	vu	du
lu	tan	lé	mé	fa	jan
mi	fau	teu	quan	mon	main
cou	li	sain	bi	dan	lou
zo	vé	gi	dain	gain	zi
nain	su	lan	chan	jo	kon
gué	don	zu	ju	leu	gu
pu	nan	qué	na	zou	né
gan	vain	bau	gou	chu	ga
ceu	feu	fou	cheu	fé	tau
von	pou	nou	zon	qua	san
ma	da	ja	lau	ban	jeu

Figure 18 : Les trois nouvelles listes

Les coefficients de variation s'améliorent. Ils restent, cependant, encore non négligeables.

Nous avons donc essayé les combinaisons de trois listes formant deux listes de 60 STI.

- ➡ Combinaison 7 (C7): L1-L4-L5, L2-L3-L7
- ➡ Combinaison 8 (C8): L1-L5-L6, L2-L3-L7
- ➡ Combinaison 9 (C9): L1-L2-L7, L3-L4-L5
- ➡ Combinaison 10 (C10): L1-L5-L6, L2-L4-L7

Voici les résultats obtenus (voir les détails en annexe 3 p89-90):

	C7	C8	C9	C10
moyenne Facteur de crête	22,08%	21,15%	27,80%	22,28%
moyenne Profondeur de modulation	20,64%	20,83%	29,36%	26,21%
moyenne Dynamique	20,40%	18,92%	30,80%	21,54%
moyenne Valeur RMS	22,99%	24,85%	22,82%	26,66%
Total surévaluation	21,53%	21,44%	27,70%	24,17%

moyenne Facteur de crête	21,07%	20,76%	22,84%	21,39%
moyenne Profondeur de modulation	20,86%	24,61%	25,38%	23,30%
moyenne Dynamique	25,60%	24,49%	26,89%	22,96%
moyenne Valeur RMS	24,64%	25,59%	33,74%	24,93%
Total sous évaluation	23,04%	23,86%	27,21%	23,15%

TOTAL enveloppes temporelles	22,29%	22,65%	27,45%	23,66%
-------------------------------------	--------	--------	--------	--------

Figure 19 : Coefficients de variation des paramètres d'enveloppe temporelle des combinaisons de trois listes.

La combinaison L1-L4-L5, L2-L3-L7 donne les meilleurs résultats.

La reproductibilité est maintenant encore meilleure.

Voici les deux nouvelles listes :

Liste 1			Liste 2		
gé	pé	pa	cha	ché	ba
chau	dau	té	bain	bou	chou
ti	guon	si	qui	ni	fin
fan	fi	zain	dou	tain	vi
pain	sau	lon	van	zeu	pau
vou	va	tou	mau	pan	neu
sa	zé	beu	nu	kau	ton
deu	jain	fu	pon	son	sé
bon	queu	vau	gueu	vu	du
lu	la	mé	lé	fa	jan
mi	nau	quan	teu	mon	main
cou	tu	bi	sain	dan	lou
zo	dé	dain	gi	gain	zi
nain	chon	chan	lan	jo	kon
gué	bu	ju	zu	leu	gu
pu	mou	na	qué	zou	né
gan	fou	gou	bau	chu	ga
ceu	nan	cheu	fon	fé	tau
von	veu	zon	nou	qua	san
ma	ta	lau	ja	ban	jeu

Figure 20 : Les deux nouvelles listes

4.3.2. Corrélation moyenne / écart type

Il nous a aussi paru intéressant de comparer l'écart type des erreurs des sept listes (Ei) avec le nombre moyen d'erreurs (Mi) de chaque patient. Voici les résultats obtenus :

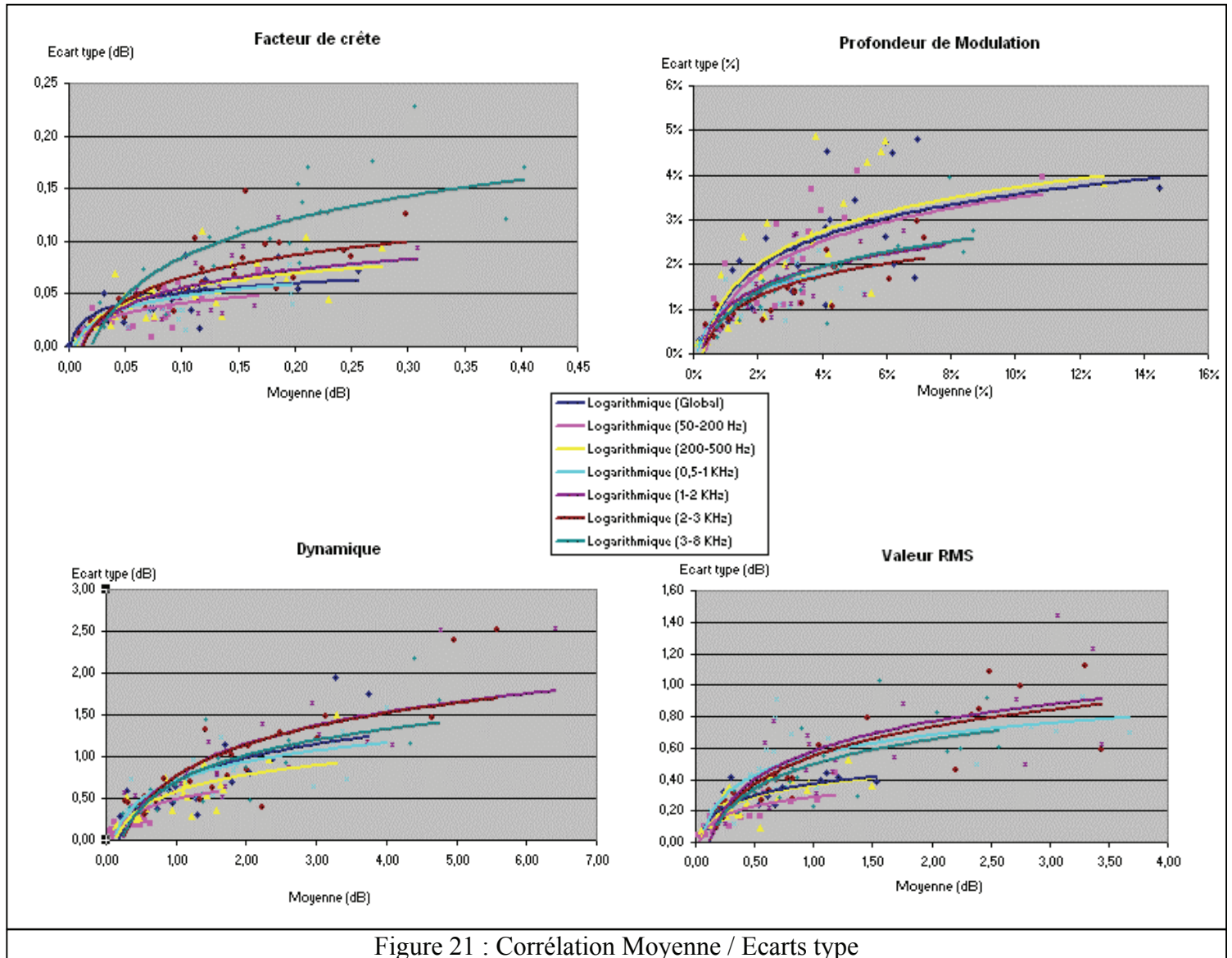


Figure 21 : Corrélation Moyenne / Ecarts type

On peut remarquer que plus la quantité d'erreurs augmente, moins l'écart type augmente. Ce qui signifie que les patients qui font beaucoup de confusions sont plus réguliers que ceux qui font moins d'erreurs.

4.4. Résultats sur les traits articulatoires et acoustiques

Les mêmes calculs ont été effectués pour les traits acoustiques et les traits articulatoires. Voici les coefficients de variation entre les sept listes obtenus :

Traits acoustiques		Traits articulatoires des consonnes		Traits articulatoires des voyelles	
Grave	60,56%	Occlusif	93,95%	Nasal	114,97%
Aigu	81,97%	Constrictif	109,30%	Oral	109,73%
Compact	80,22%	Nasal	100,63%	Arrondi	103,50%
Diffus	61,03%	Orale	115,45%	Non arrondi	71,01%
Oral	130,54%	Voisé	37,18%	Fermé	104,60%
Nasal	106,53%	Non voisé	121,90%	Mi-fermé	91,64%
Vocal	123,74%	Bilabial	82,89%	Ouvert	85,14%
Non Vocal	90,50%	Labio-dental	72,53%	Antérieur	94,59%
Continu	118,29%	Dental / Alvéolaire	70,44%	Postérieur	70,89%
Interrompu	83,94%	Post-alvéolaire	85,26%	Aigu	74,07%
Sourd	121,90%	Vélaire	85,00%	Grave	84,25%
Sonore	37,18%	Latéral	118,67%	Tendu ++	104,60%
				Tendu +	28,46%
Acuité fréquentielle	36,96%	Mode d'articulation	77,15%	Tendu -	85,52%
Acuité temporelle	94,30%	Nasalité	94,09%	Tendu --	85,14%
		Source sonore	148,14%		
		Lieu d'articulation	41,58%	Nasalité	120,54%
				Labialisation	55,01%
				Degré d'aperture	73,40%
				Lieu d'articulation	76,22%
				Fréquence	64,94%
				Tension	72,31%

Figure 22 : Coefficients de variation des traits acoustiques et articulatoires des sept listes.

Comme pour les enveloppes temporelles, les écarts types sont trop importants. La combinaison de deux listes s'impose là aussi.

Par contre toutes les listes ont, pour les traits acoustiques et articulatoires, des difficultés similaires. On peut, par conséquent, s'attendre à ce que les combinaisons aient toutes les mêmes résultats.

Voici les résultats obtenus (voir les détails en annexe 4 p91-92) :

	C1	C2	C3	C4	C5	C6
moyenne traits acoustiques	46,18%	45,49%	46,38%	44,72%	47,53%	45,54%
moyenne traits articulatoires des consonnes	48,33%	43,79%	45,70%	42,55%	46,68%	48,63%
moyenne traits articulatoires des voyelles	32,80%	36,69%	35,61%	35,45%	35,07%	34,63%
Total	41,34%	41,34%	41,73%	40,22%	42,14%	42,02%

Figure 23 : Coefficients de variation des traits acoustiques et articulatoires des combinaisons de deux listes.

On peut remarquer que :

- Les coefficients de variation sont meilleurs, mais qu'ils ne sont pas encore convenables.
- Comme prévu, toutes les combinaisons donnent des résultats similaires.
- Les coefficients de variation des listes combinées par deux sont meilleurs pour les erreurs d'enveloppe temporelle que pour les traits articulatoires et acoustiques.
- il y a moins de reproductibilité pour les traits articulatoires des consonnes que pour les traits articulatoires des voyelles. Ceci est sûrement dû à la construction des sept listes. On peut rappeler que, pour chaque liste de vingt TSI, les dix voyelles sont présentes deux fois, dix consonnes ne sont prononcées qu'une fois et cinq consonnes sont répétées deux fois.

Suite à ces observations, les combinaisons de trois listes furent calculées. Voici les résultats obtenus (voir les détails en annexe 5 p93-94) :

	C7	C8	C9	C10
moyenne traits acoustiques	32,18%	31,57%	36,34%	34,57%
moyenne traits articulatoires des consonnes	32,31%	31,87%	34,89%	34,87%
moyenne traits articulatoires des voyelles	27,48%	28,73%	26,28%	27,40%
Total	30,29%	30,50%	31,74%	31,72%

Figure 24 : Coefficients de variation des traits acoustiques et articulatoires des combinaisons de trois listes.

De même les coefficients de variation s'améliorent mais restent plus importants que ceux des enveloppes temporelles.

Là aussi, aucune combinaison ne semble meilleure que les autres.

Pour les traits acoustiques et articulatoires, nous pouvons donc conseiller de faire passer deux, voire trois listes.

4.5. Conclusions et discussions

Les sept listes du test syllabique ne sont pas reproductibles pour les erreurs d'enveloppe temporelle, de traits acoustiques ou de traits articulatoires.

Il est toutefois intéressant de remarquer que les erreurs d'enveloppe temporelle sont plus reproductibles que les erreurs de traits acoustiques et articulatoires. Ceci est inattendu puisque les listes ont été construites en se basant sur la classification des traits acoustiques.

Il est conseillé de faire passer les listes combinées pour la reproductibilité des erreurs d'enveloppe temporelle. En ce qui concerne les traits acoustiques et articulatoires, la combinaison de trois listes est fortement recommandée.

Ceci rendra évidemment le test plus long et laissera moins de choix de listes.

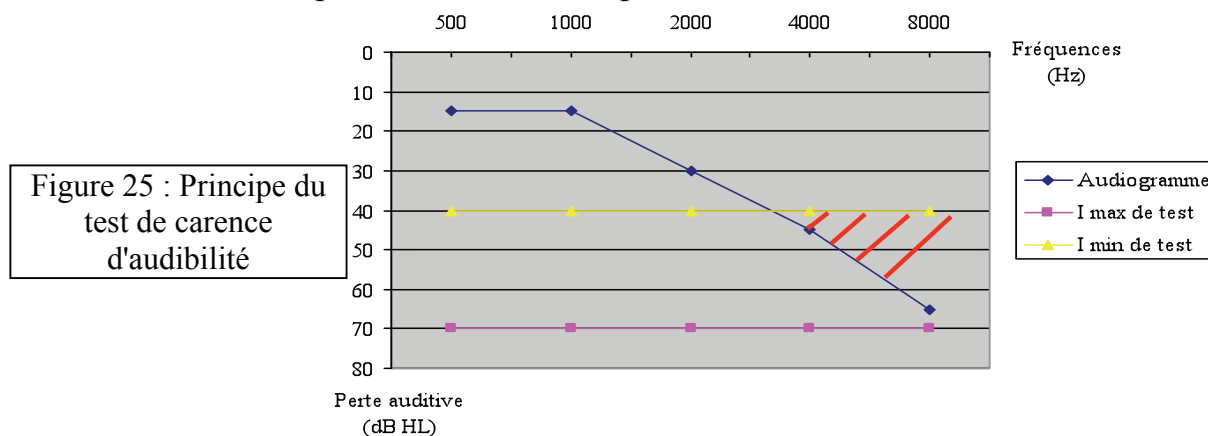
Cinquième chapitre : Etude de la sensibilité fréquentielle de l'ATEC à l'audiogramme tonal

L'ATEC calcule les erreurs d'enveloppe temporelle dans six bandes de fréquences. On peut se demander :

- Si les sujets atteints de surdité en pente de ski (fréquences aiguës plus atteintes que les fréquences graves) font plus d'erreurs dans les bandes de fréquences aiguës,
- Si les patients atteints de surdité plate (autant de perte dans les graves que dans les aigus) font autant d'erreurs dans toutes les fréquences,
- Si les personnes qui ont une surdité inversée (graves plus atteints que les aigus) font plus d'erreurs dans les basses fréquences.

Pour vérifier ces hypothèses, un test de carence d'audibilité a été effectué.

Prenons l'exemple d'une surdité en pente de ski :



A intensité maximale, le son de test est supra liminaire à toutes les fréquences. Par contre à intensité minimale, les graves sont toujours supraliminaires alors que les aigus sont devenus infraliminaires.

L'étude concerne l'augmentation du nombre d'erreurs lors de la diminution d'intensité. La question est de savoir si les erreurs augmentent plus dans les hautes fréquences que dans les basses fréquences.

5.1. Conditions du test

5.1.1. Population étudiée

Pour étudier la sensibilité fréquentielle de l'ATEC à l'audiogramme tonal, le but était de tester un maximum de sujets pour chaque type de surdité. Mais, le nombre de personnes atteintes de surdité en pente de ski est très important (notamment à cause de la presbyacousie). Par contre les surdités inversées sont rares.

28 malentendants de 68 ans en moyenne (33 à 86 ans) ont été testés :

- ➡ 16 avaient des surdités en pente de ski (19 à 81 ans),
- ➡ 8 souffraient de surdité plate (52 à 86 ans),
- ➡ 4 étaient atteints de surdité inversée (18 à 45 ans).

5.1.2. Conditions techniques du test

De même que précédemment, une seule oreille était testée au casque donc sans appareil.

Nous avons utilisé le module audiogramme du logiciel Aurical (pour régler l'intensité de test), le logiciel ATEC, un audiomètre (Aurical) et un casque.

5.1.3. Déroulement des tests

Nous cherchions à tester les erreurs de compréhension à trois intensités différentes. Pour que le test ne soit pas désagréable, il fallait que l'intensité maximale ne soit pas inconfortable. De plus le test était intéressant si les patients faisaient des confusions. L'intensité minimale devait donc être suffisamment audible pour que le sujet entende les tri syllabes mais pas trop forte non plus pour pouvoir observer les erreurs de compréhension.

Sur une première liste (non comptabilisée dans nos statistiques), nous recherchions l'intensité minimale. Ensuite, pour ne pas inquiéter le patient, nous commençons dans les meilleures conditions c'est à dire 20 dB au dessus de cette intensité. Nous vérifions que ce n'était pas trop fort et nous faisons deux listes. Puis nous diminuons de 10 dB et nous refaisons 2 listes. Enfin, nous diminuons une dernière fois de 10 dB pour terminer avec les 2 dernières listes. Nous commençons par une liste différente pour chaque personne.

Voici les intensités de test moyennes, maximales et minimales (en dB SPL) pour les trois situations de test :

		Surdité inversée	Surdité plate	Surdité en pente de ski
Intensité maximale	moy	86,25	92,5	88,44
	max	100	110	120
	min	80	70	65
Intensité intermédiaire	moy	76,25	82,5	78,44
	max	90	100	110
	min	70	60	55
Intensité minimale	moy	66,25	72,5	68,44
	max	80	90	100
	min	60	50	45

Figure 26 : Intensités de test pour la sensibilité de l'ATEC à l'audiogramme tonal

Voici le nombre moyen de phonèmes erronés et le pourcentage de consonnes et de voyelles erronées pour chaque groupe de patients aux trois intensités de test.

		Surdité inversée	Surdité plate	Surdité en pente de ski
Intensité maximale	Nb de phonèmes erronés	3,88	4,69	6,44
	% Consonnes erronées	10,00%	14,38%	19,84%
	% voyelles erronées	9,38%	9,06%	12,34%
Intensité intermédiaire	Nb de phonèmes erronés	4,13	7,81	7,75
	% Consonnes erronées	10,00%	28,13%	27,66%
	% voyelles erronées	10,63%	10,94%	11,09%
Intensité minimale	Nb de phonèmes erronés	11,13	16,69	14,72
	% Consonnes erronées	30,63%	55,31%	48,59%
	% voyelles erronées	25,00%	28,13%	25,00%

Figure 27 : Résultats du test syllabique pour la sensibilité de l'ATEC à l'audiogramme tonal

5.2. Analyses statistiques et résultats

5.2.1. Les six bandes de fréquences

5.2.1.1. Augmentation de la quantité d'erreurs lorsque l'intensité de test est diminuée

Nous avons d'abord calculé la moyenne des erreurs de chaque groupe de patients (donc de chaque type de surdité), pour chaque intensité de test, pour chaque paramètre d'enveloppe temporelle et dans toutes les fréquences.

Ensuite, nous avons choisi les erreurs à intensité maximale comme référence, afin d'étudier l'augmentation du nombre d'erreurs lors de la diminution de l'intensité de test. Nous avons utilisés les formules suivantes :

$$\frac{\text{Nb d'erreurs à intensité intermédiaire} - \text{Nb d'erreurs à intensité maximale}}{\text{Nb d'erreurs à intensité maximale}}$$
$$\frac{\text{Nb d'erreurs à intensité minimale} - \text{Nb d'erreurs à intensité maximale}}{\text{Nb d'erreurs à intensité maximale}}$$

Les résultats ont été représentés sous forme graphique pour faciliter la compréhension :

Surévaluation des enveloppes temporelles.

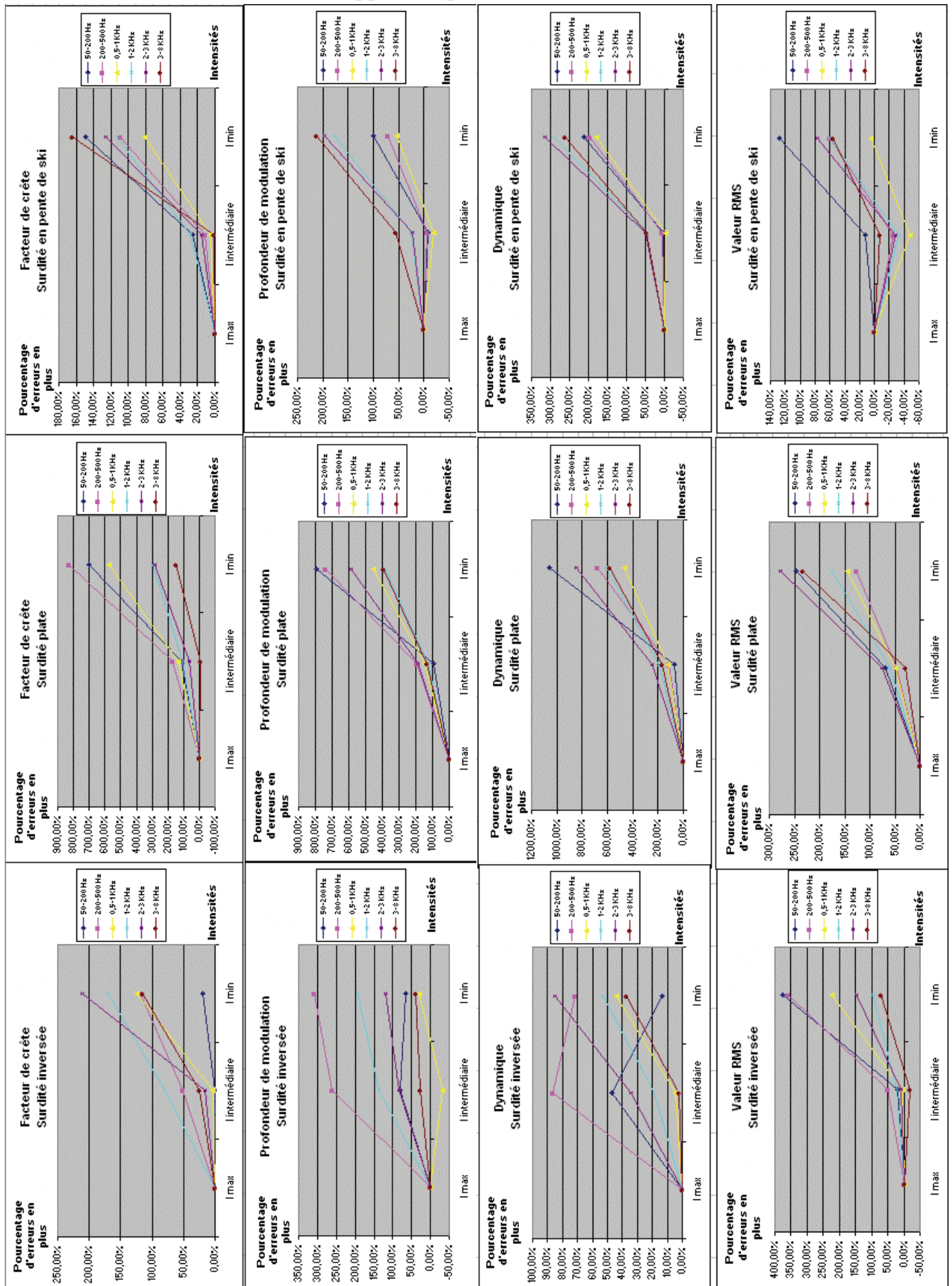


Figure 28 : Surévaluation des enveloppes temporelles lors de la carence d'audibilité.

➤ Sous-évaluation des enveloppes temporelles.

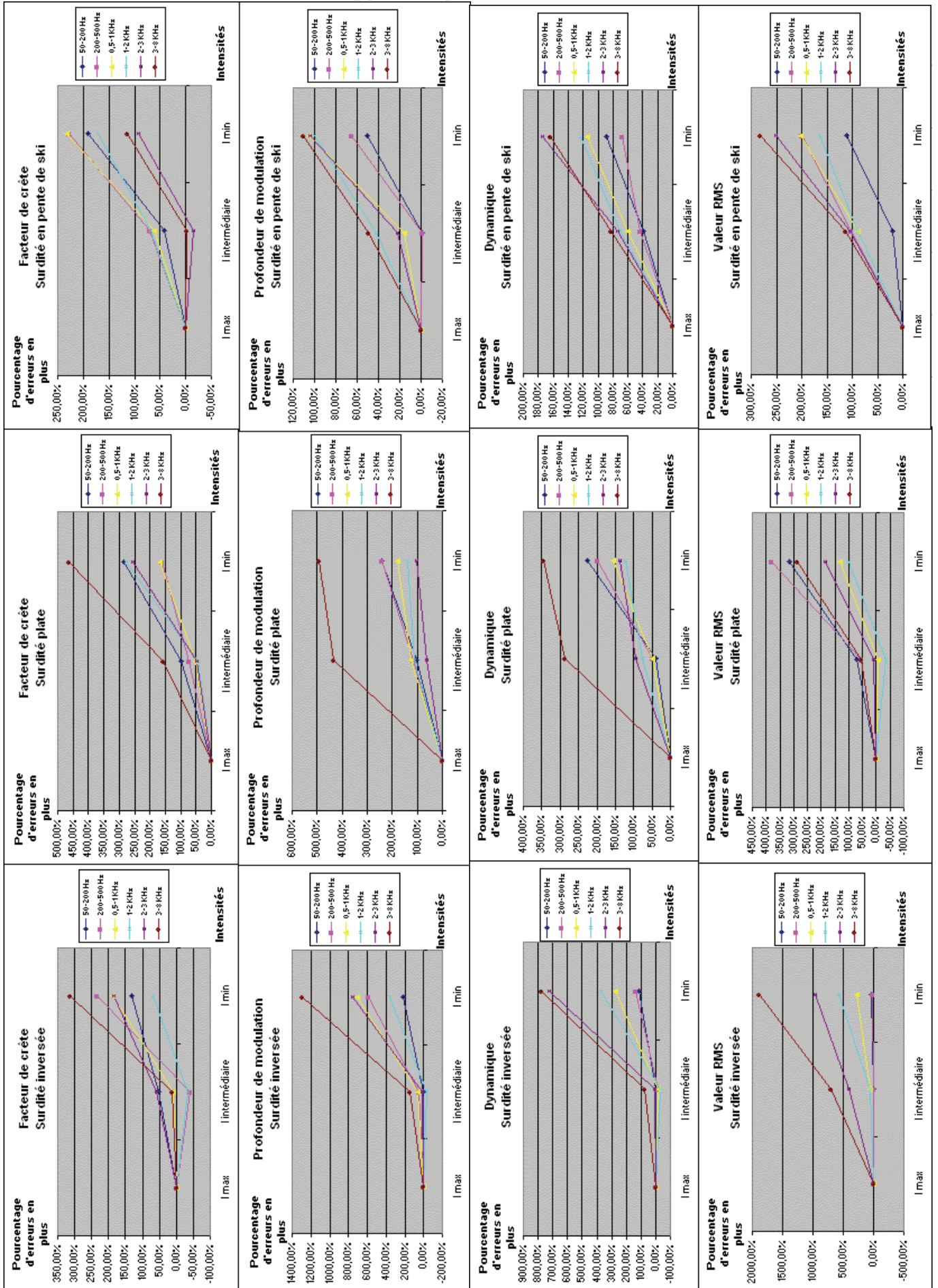


Figure 28 : Sous-évaluation des enveloppes temporelles lors de la carence d'audibilité.

➤ Total des erreurs d'enveloppe temporelle.

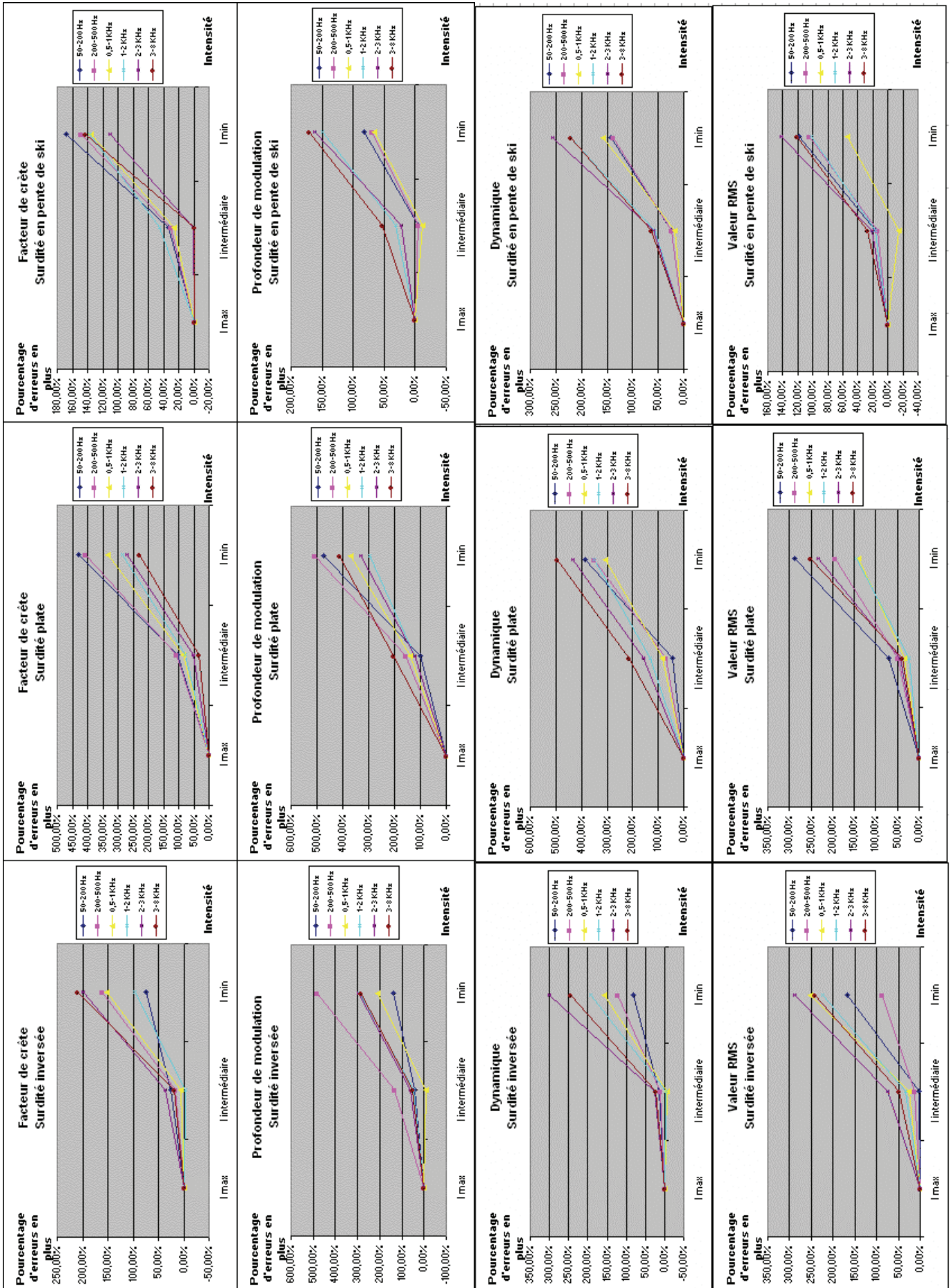


Figure 28 : Total des erreurs d'enveloppe temporelle lors de la carence d'audibilité.

On peut remarquer que:

➤ Pour la surévaluation des enveloppes temporelles :

- Pour la surdité inversée, la bande de fréquences 200-500 Hz est la plus fragile. Mais les autres ont un ordre arbitraire.
- Pour les surdités en pente de ski, les trois bandes de fréquence plus aiguës sont les plus erronées alors que les trois bandes de fréquences les plus graves sont les moins erronées. Mais cela n'est observable que pour la profondeur de modulation et la dynamique.

➤ Pour la sous-évaluation des enveloppes temporelles :

- La bande de fréquences 3-8 kHz est la plus fragile.
- Les autres bandes de fréquences n'ont pas d'ordre clair.

➤ Pour le total des erreurs d'enveloppe temporelle :

- Pour la surdité en pente de ski, on retrouve les deux groupes de bandes de fréquences pour la profondeur de modulation et la dynamique. Mais il y a plus de dispersion avec les surdités plates et les résultats ne sont pas nets pour les surdités inversées.

Nous rappelons que les hypothèses de départ étaient que lorsque l'intensité de test diminue, les patients font plus d'erreurs et surtout:

- Dans les aigus pour les surdités en pente de ski.
- Dans toutes les fréquences pour les surdités plates.
- Dans les graves pour les surdités inversées.

D'après les résultats décrits plus haut, nous pouvons donc penser que **lorsque l'on étudie les six bandes de fréquences séparément, l'ATEC semble peu sensible à la carence d'audibilité.**

5.2.1.2. Comparaison des bandes de fréquences

Pour vérifier cette information, nous avons comparé les trois bandes de fréquences aiguës avec les trois bandes de fréquences graves.

Nous sommes repartis des résultats précédents. Pour chaque bande de fréquences, nous avons gardé les résultats des opérations :

$$X = \frac{\text{Nb d'erreurs à intensité minimale} - \text{Nb d'erreurs à intensité maximale}}{\text{Nb d'erreurs à intensité maximale}}$$

Nous avons donc une valeur X pour chaque paramètre d'enveloppe temporelle, en surévaluation, en sous-évaluation, au total et pour chaque bande de fréquences : X1 pour le canal 50-200 Hz, X2 pour la bande de fréquences 200-500 Hz, X3 pour la bande de fréquences 0,5-1 KHz, X4 pour la bande de fréquences 1-2 KHz, X5 pour la bande de fréquences 2-3 KHz et enfin X6 pour la bande de fréquences 3-8 KHz.

Pour comparer les bandes de fréquences entre elles, nous avons effectué les calculs suivant : $(X4-X3)/X3$, $(X4-X2)/X2$, $(X4-X1)/X1$; $(X5-X3)/X3$, $(X5-X2)/X2$, $(X5-X1)/X1$; $(X6-X3)/X3$, $(X6-X2)/X2$, $(X6-X1)/X1$.

Si les résultats sont cohérents, les résultats seront

- ➡ Inférieurs à 0%, pour les surdités inversées.
- ➡ Compris entre les résultats des deux autres types de surdité, pour les surdités plates.
- ➡ supérieurs à 0%, pour les surdités en pente de ski.

Voici les résultats obtenus :

Surévaluation	(X4-X3)/X3			(X4-X2)/X2			(X4-X1)/X1		
	inv.	plat	ski	inv.	plat	ski	inv.	plat	ski
Facteur de crête	37%	-48%	40%	43%	-64%	4%	768%	-58%	-24%
Profondeur de modulation	558%	-16%	225%	-37%	-48%	149%	196%	-52%	77%
Dynamique	20%	30%	63%	-26%	-11%	49%	297%	-43%	39%
Valeur RMS	-57%	21%	1079%	-73%	39%	-1%	-74%	-29%	-53%
Sous-évaluation									
Facteur de crête	-63%	66%	-27%	-70%	72%	-25%	-47%	-3%	-11%
Profondeur de modulation	-48%	-23%	-6%	-38%	-43%	52%	71%	-43%	95%
Dynamique	36%	-21%	8%	169%	-38%	84%	227%	-46%	39%
Valeur RMS	103%	-23%	-18%	2147%	-73%	-18%	1339%	-68%	49%
Total									
Facteur de crête	-36%	-14%	1%	-39%	-30%	-8%	30%	-33%	-18%
Profondeur de modulation	40%	-20%	129%	-40%	-42%	114%	110%	-37%	82%
Dynamique	21%	16%	40%	59%	0%	60%	137%	-8%	56%
Valeur RMS	-11%	4%	89%	156%	-25%	-2%	35%	-49%	-14%

Surévaluation	(X5-X3)/X3			(X5-X2)/X2			(X5-X1)/X1		
	inv.	plat	ski	inv.	plat	ski	inv.	plat	ski
Facteur de crête	69%	-51%	56%	78%	-66%	15%	976%	-60%	-16%
Profondeur de modulation	303%	29%	261%	-61%	-21%	177%	81%	-26%	96%
Dynamique	93%	82%	75%	19%	25%	60%	540%	-20%	49%
Valeur RMS	-34%	93%	1408%	-59%	121%	27%	-61%	13%	-40%
Sous-évaluation									
Facteur de crête	-2%	54%	-60%	-21%	59%	-59%	40%	-10%	-51%
Profondeur de modulation	7%	-42%	-1%	29%	-58%	59%	254%	-57%	104%
Dynamique	162%	-13%	52%	417%	-31%	159%	529%	-40%	96%
Valeur RMS	238%	41%	25%	3637%	-51%	26%	2293%	-41%	128%
Total									
Facteur de crête	30%	-19%	-19%	23%	-34%	-26%	164%	-37%	-35%
Profondeur de modulation	42%	-11%	148%	-39%	-35%	132%	114%	-30%	97%
Dynamique	90%	42%	62%	149%	23%	85%	271%	13%	80%
Valeur RMS	14%	66%	163%	228%	20%	36%	73%	-18%	20%

Surévaluation	(X6-X3)/X3			(X6-X2)/X2			(X6-X1)/X1		
	inv.	plat	ski	inv.	plat	ski	inv.	plat	ski
Facteur de crête	-8%	-74%	104%	-4%	-82%	51%	483%	-79%	10%
Profondeur de modulation	35%	-14%	291%	-87%	-47%	200%	-39%	-51%	113%
Dynamique	-16%	24%	46%	-49%	-14%	33%	177%	-45%	24%
Valeur RMS	-68%	61%	995%	-80%	84%	-8%	-81%	-6%	-56%
Sous-évaluation									
Facteur de crête	65%	177%	-51%	34%	187%	-50%	136%	62%	-40%
Profondeur de modulation	82%	177%	5%	119%	103%	69%	500%	104%	116%
Dynamique	180%	121%	43%	454%	75%	144%	573%	53%	84%
Valeur RMS	561%	117%	40%	7196%	-25%	41%	4573%	-9%	155%
Total									
Facteur de crête	38%	-30%	5%	31%	-43%	-4%	180%	-46%	-15%
Profondeur de modulation	38%	12%	163%	-41%	-19%	146%	108%	-13%	108%
Dynamique	54%	62%	40%	102%	40%	60%	201%	29%	56%
Valeur RMS	-4%	79%	125%	176%	29%	17%	46%	-12%	3%

Figure 29 : Comparaison des trois bandes de fréquences les plus aiguës avec les trois bandes de fréquences les plus graves.

Surlignés en jaune les caractéristiques qui vérifient les trois hypothèses :

➤ En surévaluation on peut retenir :

➡ La profondeur de modulation pour les comparaisons :

Des canaux 2-3 KHz et 200-500 Hz,

Des canaux 3-8 KHz et 200-500 Hz.

➡ La dynamique pour les comparaisons :

Des canaux 1-2 KHz et 200-500 Hz.

Des canaux 3-8 KHz et 0,5-1 KHz.

Des canaux 3-8 KHz et 200-500 Hz.

➡ La valeur RMS pour toutes les comparaisons avec la bande de fréquences 0,5-1 KHz

➤ En sous-évaluation, on ne peut retenir que la dynamique pour la comparaison 1-2 KHz et 2-3 KHz.

➤ Au total, on peut retenir :

➡ La profondeur de modulation pour les comparaisons :

Des canaux 2-3 KHz et 200-500 Hz

Des canaux 3-8 KHz et 200-500 Hz.

➡ La valeur RMS pour les comparaisons :

Des canaux 1-2 KHz et 0,5-1 KHz.

Des canaux 3-8 KHz et 0,5-1 KHz.

On peut aussi remarquer que les hypothèses se vérifient dans quasiment tous les cas pour les surdités en pente de ski.

Maintenant, si on ne tient pas compte du groupe des surdités inversées (trop peu de sujets) et si on surligne en bleu les paramètres qui vérifient les hypothèses pour les surdités plates et en pente de ski, voici les résultats :

Surévaluation	4/3		4/2		4/1	
	plat	ski	plat	ski	plat	ski
Facteur de crête	-48%	40%	-64%	4%	-58%	-24%
Profondeur de modulation	-16%	225%	-48%	149%	-52%	77%
Dynamique	30%	63%	-11%	49%	-43%	39%
Valeur RMS	21%	1079%	39%	-1%	-29%	-53%
Sous-évaluation						
Facteur de crête	66%	-27%	72%	-25%	-3%	-11%
Profondeur de modulation	-23%	-6%	-43%	52%	-43%	95%
Dynamique	-21%	8%	-38%	84%	-46%	39%
Valeur RMS	-23%	-18%	-73%	-18%	-68%	49%
Total						
Facteur de crête	-14%	1%	-30%	-8%	-33%	-18%
Profondeur de modulation	-20%	129%	-42%	114%	-37%	82%
Dynamique	16%	40%	0%	60%	-8%	56%
Valeur RMS	4%	89%	-25%	-2%	-49%	-14%

Surévaluation	5/3		5/2		5/1	
	plat	ski	plat	ski	plat	ski
Facteur de crête	-51%	56%	-66%	15%	-60%	-16%
Profondeur de modulation	29%	261%	-21%	177%	-26%	96%
Dynamique	82%	75%	25%	60%	-20%	49%
Valeur RMS	93%	1408%	121%	27%	13%	-40%
Sous-évaluation						
Facteur de crête	54%	-60%	59%	-59%	-10%	-51%
Profondeur de modulation	-42%	-1%	-58%	59%	-57%	104%
Dynamique	-13%	52%	-31%	159%	-40%	96%
Valeur RMS	41%	25%	-51%	26%	-41%	128%
Total						
Facteur de crête	-19%	-19%	-34%	-26%	-37%	-35%
Profondeur de modulation	-11%	148%	-35%	132%	-30%	97%
Dynamique	42%	62%	23%	85%	13%	80%
Valeur RMS	66%	163%	20%	36%	-18%	20%

Surévaluation	6/3		6/2		6/1	
	plat	ski	plat	ski	plat	ski
Facteur de crête	-74%	104%	-82%	51%	-79%	10%
Profondeur de modulation	-14%	291%	-47%	200%	-51%	113%
Dynamique	24%	46%	-14%	33%	-45%	24%
Valeur RMS	61%	995%	84%	-8%	-6%	-56%
Sous-évaluation						
Facteur de crête	177%	-51%	187%	-50%	62%	-40%
Profondeur de modulation	177%	5%	103%	69%	104%	116%
Dynamique	121%	43%	75%	144%	53%	84%
Valeur RMS	117%	40%	-25%	41%	-9%	155%
Total						
Facteur de crête	-30%	5%	-43%	-4%	-46%	-15%
Profondeur de modulation	12%	163%	-19%	146%	-13%	108%
Dynamique	62%	40%	40%	60%	29%	56%
Valeur RMS	79%	125%	29%	17%	-12%	3%

Figure 30 : Résultats pour les surdités plates et en pente de ski.

On remarque que lorsque l'on ne tient pas compte du groupe des surdités inversées, les hypothèses sont très souvent vérifiées :

- Elles le sont toujours pour les comparaisons avec le canal 5 (sauf pour le facteur de crête).
- Par contre le facteur de crête ne vérifie jamais les hypothèses (sauf en surévaluation en comparaison 5/3 et 6/3)
- De même les comparaisons avec la troisième bande de fréquences donnent peu de résultats en sous-évaluation.

Pour en savoir plus, nous nous sommes demandé si en regroupant les trois bandes de fréquence les plus graves et les trois bandes de fréquences les plus aiguës, les hypothèses seraient mieux vérifiées.

5.2.2. Comparaison des bandes de fréquences 50-1000 Hz et 1-8 KHz

5.2.2.1. Augmentation de la quantité d'erreurs lorsque l'intensité de test est diminuée

Pour pouvoir comparer les trois canaux aigus avec les trois canaux graves, nous avons créé deux grandes bandes de fréquences : 50-1000 Hz et 1-8 KHz.

Nous avons d'abord fait la moyenne de tous les résultats pour les bandes de fréquences 50-200 Hz, 200-500 Hz et 0,5-1 KHz d'une part et 1-2 KHz, 2-3 KHz et 3-8 KHz d'autre part.

Puis nous avons effectué les mêmes calculs que précédemment :

Nb d'erreurs à intensité intermédiaire - Nb d'erreurs à intensité maximale

Nb d'erreurs à intensité maximale

Nb d'erreurs à intensité minimale - Nb d'erreurs à intensité maximale

Nb d'erreurs à intensité maximale

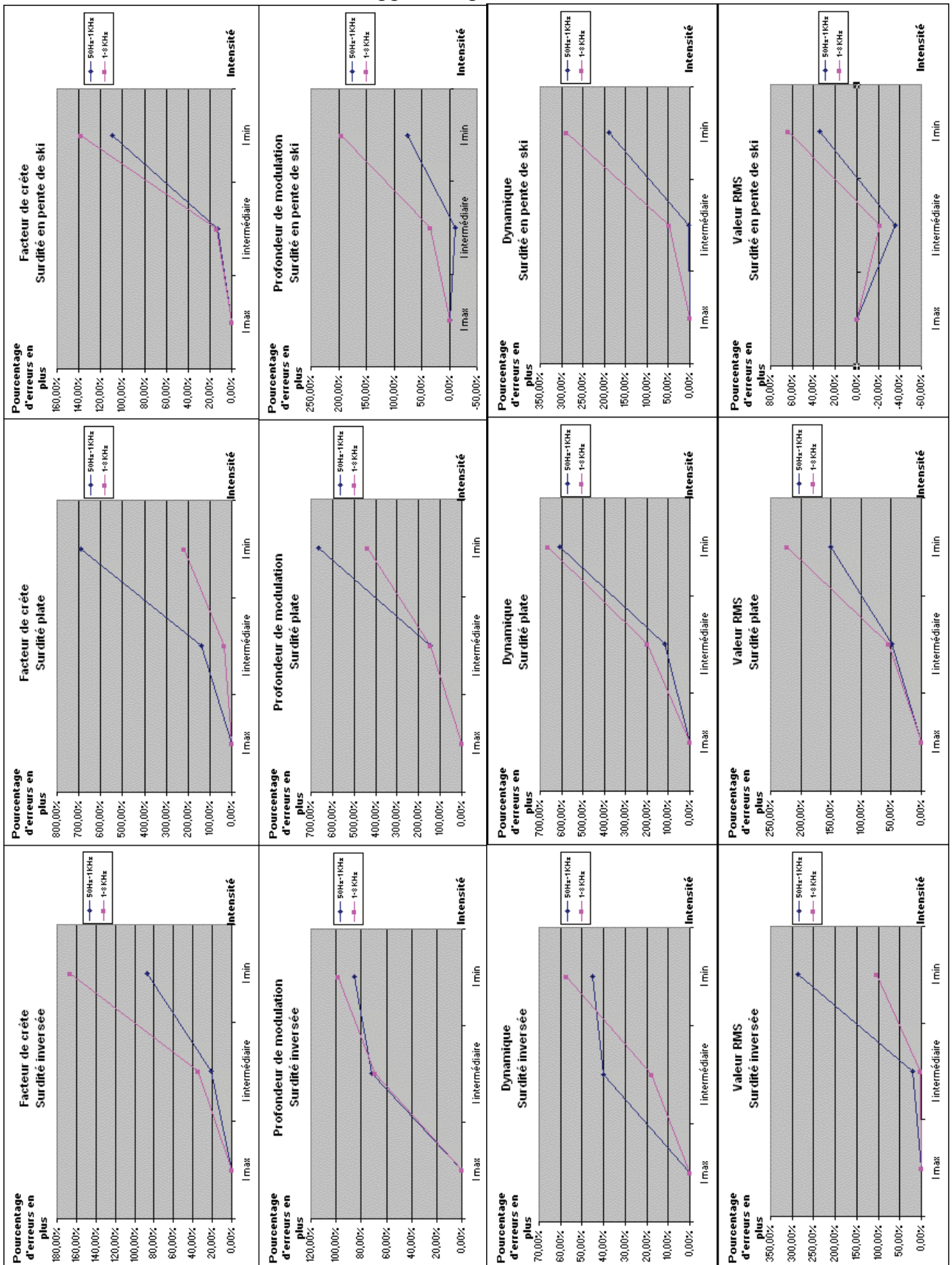


Figure 30 : Surévaluation des enveloppes temporelles lors de la carence d'audibilité (deux bandes de fréquences).

➤ Sous-évaluation des enveloppes temporelles

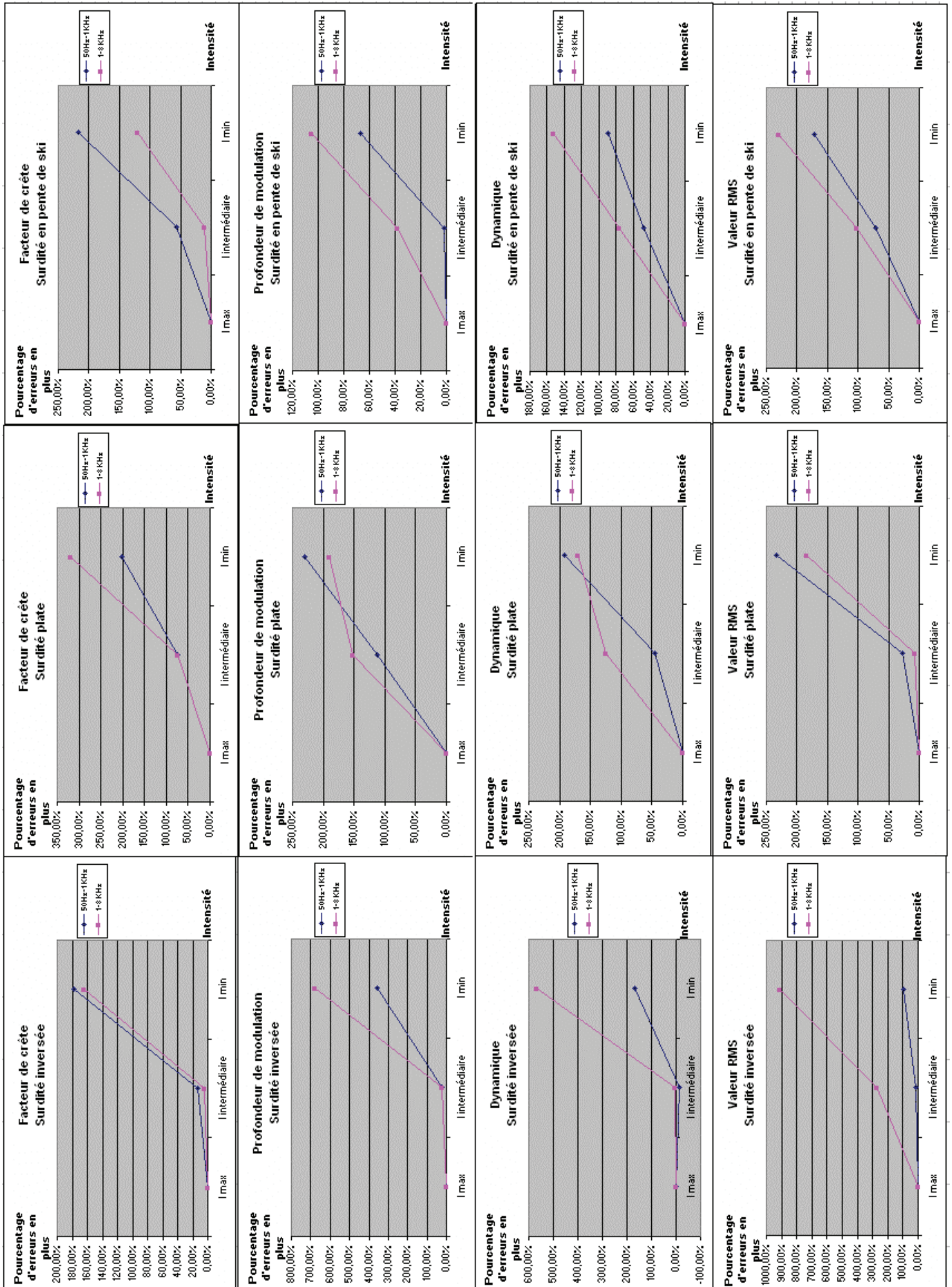


Figure 31 : Sous-évaluation des enveloppes temporelles lors de la carence d'audibilité (deux bandes de fréquences).

➤ Total des erreurs d'enveloppe temporelle.

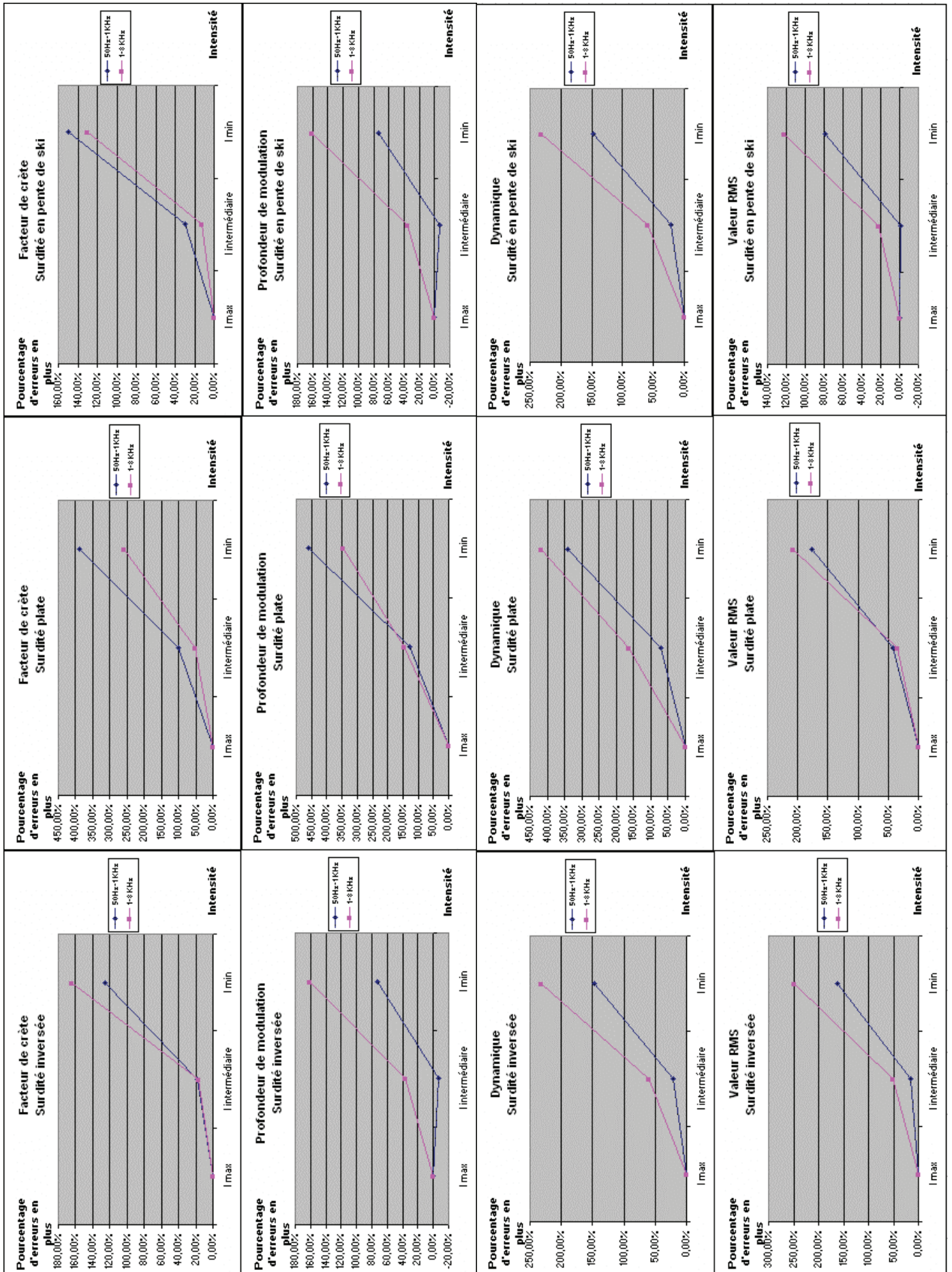


Figure 31 : Total des erreurs d'enveloppe temporelle lors de la carence d'audibilité (deux bandes de fréquences).

Cette fois-ci, aucune hypothèse ne semble vérifiée :

➡ Tous les patients, quelle que soit leur surdité, font toujours plus d'erreurs dans les aigus que dans les graves (sauf pour la surévaluation de la valeur RMS).

Nous avons souhaité en être sûr en comparant de façon chiffrée les résultats.

5.2.2.2. Comparaison des bandes de fréquences

Nous avons procédé de la même façon qu'au dessus.

Pour chaque bande de fréquences, nous avons gardé les résultats des opérations :

$$X = \frac{\text{Nb d'erreurs à intensité minimale} - \text{Nb d'erreurs à intensité maximale}}{\text{Nb d'erreurs à intensité maximale}}$$

Nous avons donc une valeur X pour chaque paramètre d'enveloppe temporelle, en surévaluation, en sous-évaluation, au total et pour chaque bande de fréquences : X7 pour la bande de fréquences grave et X8 pour la bande de fréquences aiguë. Pour comparer les bandes de fréquences entre elles, nous avons effectué le calcul suivant : (X7-X8)/X8.

Voici les résultats obtenus :

Figure 32 : Comparaison des bandes de fréquences 50-1000 Hz et 1-8 KHz.

Surévaluation			
	inv.	plat	ski
Facteur de crête	91%	-68%	26%
Profondeur de modulation	16%	-34%	159%
Dynamique	27%	9%	52%
Valeur RMS	-64%	49%	85%
Sous-évaluation			
Facteur de crête	-8%	58%	-44%
Profondeur de modulation	89%	-18%	57%
Dynamique	238%	-11%	71%
Valeur RMS	858%	-21%	34%
Total			
Facteur de crête	31%	-33%	-13%
Profondeur de modulation	37%	-25%	121%
Dynamique	95%	22%	58%
Valeur RMS	53%	17%	55%

Comme prévu les hypothèses ne sont vérifiées que pour la valeur RMS en surévaluation.

Comme précédemment nous avons voulu savoir si les résultats étaient bons pour les surdités plates et en pente de ski.

Surévaluation		
	plat	ski
Facteur de crête	-68%	26%
Profondeur de modulation	-34%	159%
Dynamique	9%	52%
Valeur RMS	49%	85%
Sous-évaluation		
Facteur de crête	58%	-44%
Profondeur de modulation	-18%	57%
Dynamique	-11%	71%
Valeur RMS	-21%	34%
Total		
Facteur de crête	-33%	-13%
Profondeur de modulation	-25%	121%
Dynamique	22%	58%
Valeur RMS	17%	55%

Cette fois, **seul le facteur de crête ne vérifie pas les hypothèses.**

Figure 33 : Comparaison des bandes de fréquences 50-1000 Hz et 1-8 KHz pour les surdités plates et en pente de ski.

5.3. Conclusions et discussions

L'ATEC est sensible aux surdités plates et en pente de ski, surtout lorsque les bandes de fréquences sont cumulées.

Voici un classement des paramètres, du plus sensible au moins sensible :

- La profondeur de modulation est systématiquement pertinente (sauf pour les fréquences supérieures à 3000 Hz, fréquences peu utilisées pour la compréhension de la parole).
- La valeur RMS et la dynamique donnent souvent de bons résultats.
- Le facteur de crête semble le moins pertinent dans cette étude.

Il faut toutefois se méfier des sur et sous-évaluations. En effet quand un patient hésite sur la syllabe qu'il a entendu, il y a une part de hasard dans son choix. Le calcul du total des erreurs semble donc plus pertinent.

De plus, lorsque les patients ne répètent aucun phonème, l'ATEC le comptabilise pour le test syllabique mais il n'en tient pas compte pour ses calculs d'erreurs d'enveloppes temporelles. En effet, on ne peut pas deviner quel paramètre a gêné le patient pour comprendre. Ceci peut aussi expliquer la moins bonne sensibilité dans certaines conditions.

En ce qui concerne les surdités inversées, plusieurs hypothèses peuvent expliquer l'absence de sensibilité :

- Les fréquences graves ont plus d'énergie que les fréquences aiguës (voir le premier chapitre p14).
- Le nombre de patients atteints de surdité inversée est trop faible.

Sixième chapitre : Etude de la sensibilité de l'ATEC aux différences de perceptions syllabiques avec et sans appareil

Le but ultime de l'ATEC est d'aider au réglage des appareils auditifs. Il serait donc souhaitable que le test soit sensible au port des appareils.

Dans un premier temps, nous pensions étudier ce paramètre de la même façon que la sensibilité à l'audiogramme tonal. En effet :

- Pour une surdité en pente de ski, les fréquences aiguës sont les plus touchées. Elles doivent donc être corrigées en priorité par les prothèses. Ainsi, les différences de pourcentage d'erreurs avec et sans appareil devraient être plus importantes dans les aigus que dans les graves.
- Pour une surdité plate, toutes les fréquences sont atteintes à peu près de la même manière. Les différences de pourcentage d'erreurs avec et sans appareil devraient donc être à peu près égale quelle que soit la fréquence.
- Pour les surdités inversées, les fréquences graves sont plus fragiles que les fréquences aiguës. Les réglages doivent donc être plus importants dans ces fréquences. Ainsi, les différences de pourcentage d'erreurs avec et sans appareil devraient être plus importantes dans les graves que dans les aigus.

Mais nous nous sommes rendu compte que cette théorie n'est pas toujours vérifiée et que le gain prothétique tonal (apport quantitatif fréquentiel des appareils) n'est pas toujours en rapport avec le type de surdité.

Il a donc été décidé d'étudier la corrélation entre les erreurs et le gain prothétique tonal : l'écart entre la quantité d'erreur sans appareil et celle avec appareils est-il plus important lorsque le gain prothétique tonal est meilleur ?

Lorsque nous avons pris la décision de modifier l'étude, il n'était plus possible de revoir les patients. C'est pourquoi les valeurs de gain prothétique ont été récupérées sur les dossiers des patients. Voici les gains prothétiques moyens de tous les patients :

200-500 Hz	3,24 dB
0,5-1 KHz	6,22 dB
1-2 KHz	11,76 dB
2-8 KHz	15,20 dB

6.1. Conditions du test

6.1.1. Population étudiée

39 patients ont accepté de participer à ce test. Ils sont âgés de 62 ans en moyenne (entre 14 et 81 ans).

32 sont appareillés en binaural.

6.1.2. Conditions techniques du test

Le test était effectué en champ libre pour pouvoir tester avec appareils. Pour les sept personnes qui ne sont appareillées que d'un côté, l'oreille controlatérale était masquée à l'aide d'un casque.

Nous avons utilisé le module audiogramme du logiciel Aurical (pour régler l'intensité de test), le logiciel ATEC, l'audiomètre Aurical, un casque et un haut-parleur.

6.1.3. Déroulement des tests

Pour pouvoir comparer les résultats avec et sans appareil, il fallait que les sons tests soient identiques dans les deux conditions. L'intensité devait donc être ni trop faible pour que le patient puisse entendre sans ses appareils, ni trop forte pour qu'il fasse des erreurs :

- ➡ Intensité moyenne sur tous les patients : 56,51 dB SPL
- ➡ Intensité maximale : 80 dB SPL
- ➡ Intensité minimale : 40 dB SPL

Pour ne pas fatiguer les sujets, nous commençons par trois listes avec les appareils, puis nous terminons avec les trois listes sans appareil. Pour chaque patient, nous commençons par une liste différente.

Voici le nombre moyen de phonèmes erronés et le pourcentage moyen de consonnes et de voyelles erronées, avec et sans appareil.

	Sans appareil	Avec appareils
Nb de phonèmes erronés	24,25	10,25
% Consonnes erronées	42,83%	18,79%
% voyelles erronées	18,83%	8,54%

Figure 34 : Résultats du test syllabique pour la sensibilité de l'ATEC au port des appareils.

Bien sûr le nombre de phonèmes erronés diminue lorsque les appareils sont portés.

6.2. Analyses statistiques et résultats

Nous avons d'abord calculé la moyenne des erreurs avec et sans appareil, de chaque patient, pour chaque paramètre d'enveloppe temporelle et dans toutes les bandes de fréquences.

Ensuite, nous avons plusieurs calculs statistiques possibles : nous pouvons calculer :

- Le pourcentage d'augmentation du nombre d'erreur lorsque les appareils sont retirés :

$$X = \frac{\text{Erreurs sans appareil} - \text{Erreurs avec appareils}}{\text{Erreurs avec appareils}}$$

➤ Le pourcentage de diminution du nombre d'erreur lorsque les appareils sont portés.

$$X = \frac{\text{Erreurs sans appareil} - \text{Erreurs avec appareils}}{\text{Erreurs sans appareils}}$$

Mais les quantités d'erreurs des enveloppes temporelles, que ce soit avec ou sans appareil, sont tellement petites que ces deux formules donnaient des résultats aberrants (jusqu'à plus de 5000% en dynamique)

Le pourcentage ne semblait donc pas être une bonne solution. Nous avons donc simplement utilisé la formule suivante :

$$\text{Erreurs sans appareil} - \text{Erreurs avec appareils}$$

Puis nous avons représenté la corrélation entre l'augmentation des erreurs lorsque l'on retire l'appareil et le gain prothétique grâce aux courbes de corrélation calculées par EXCEL.

En abscisse est représenté le gain prothétique et en ordonnée, on trouve la différence d'erreurs.

Si les hypothèses sont vérifiées (c'est-à-dire si la différence d'erreurs avec et sans appareil augmente lorsque le gain prothétique augmente), on devrait observer des courbes croissantes.

Les résultats sont présentés pages suivantes :

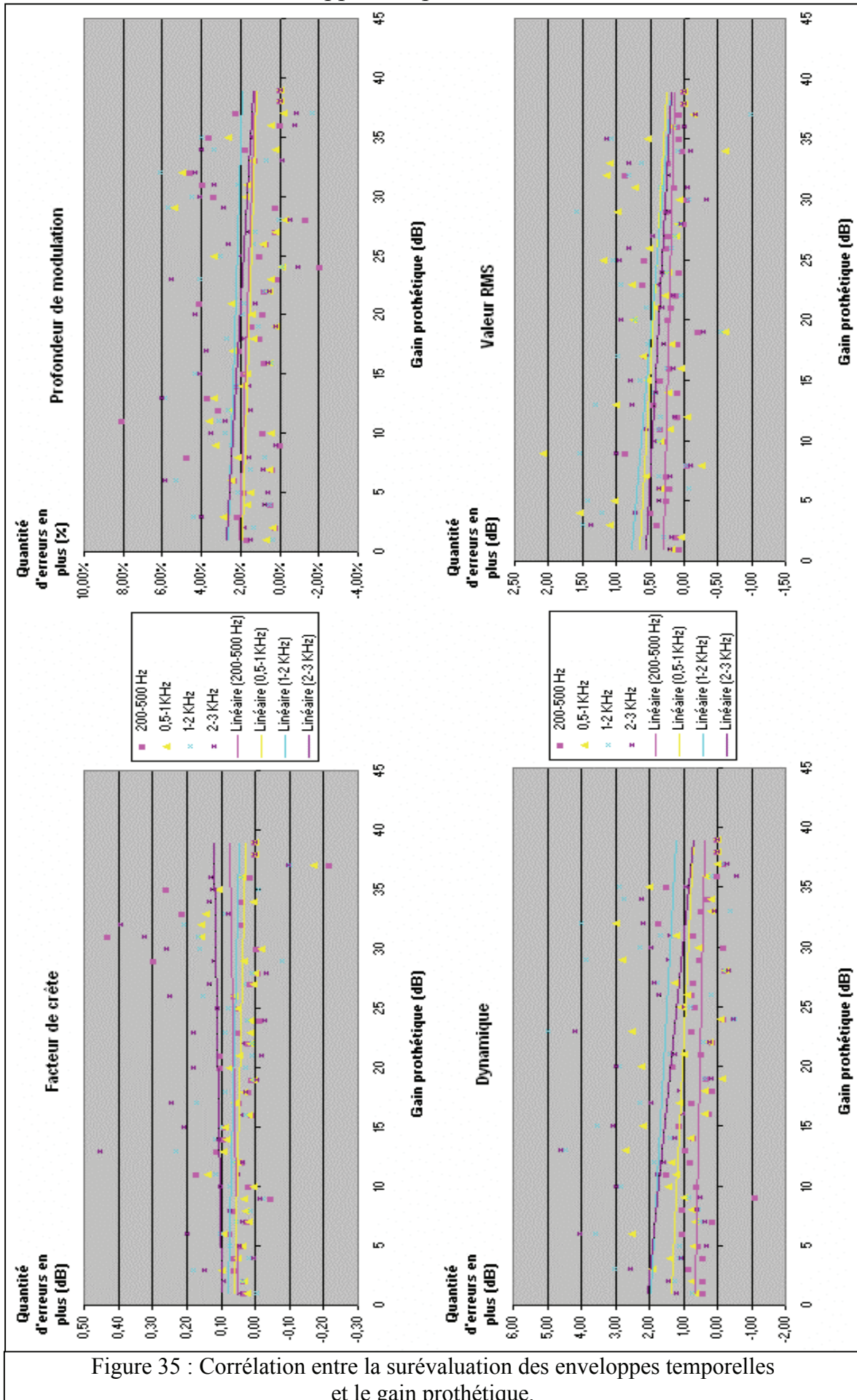


Figure 35 : Corrélation entre la surévaluation des enveloppes temporelles et le gain prothétique.

➤ Sous-évaluation des enveloppes temporelles

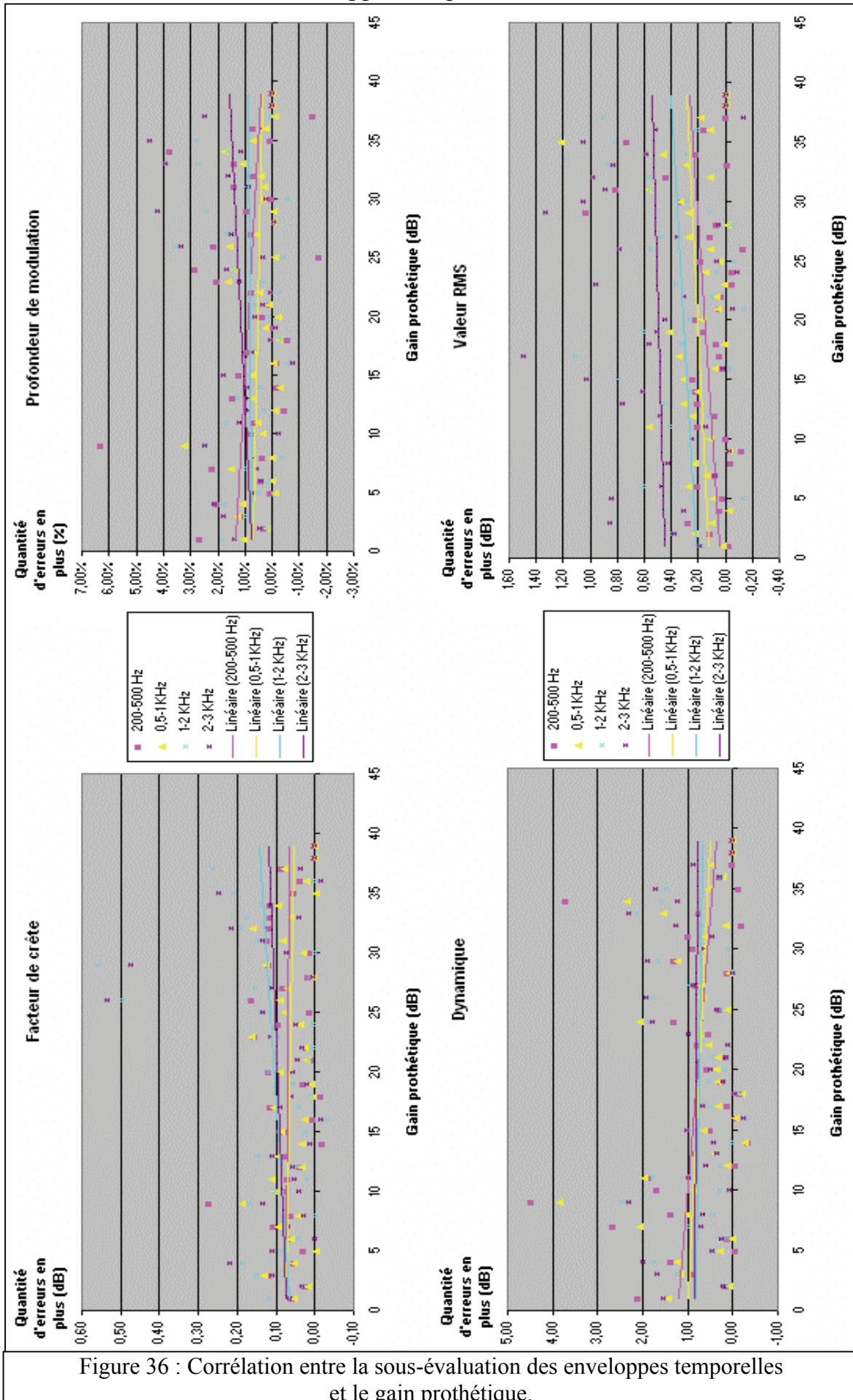


Figure 36 : Corrélation entre la sous-évaluation des enveloppes temporelles et le gain prothétique.

➤ Total des erreurs d'enveloppe temporelle

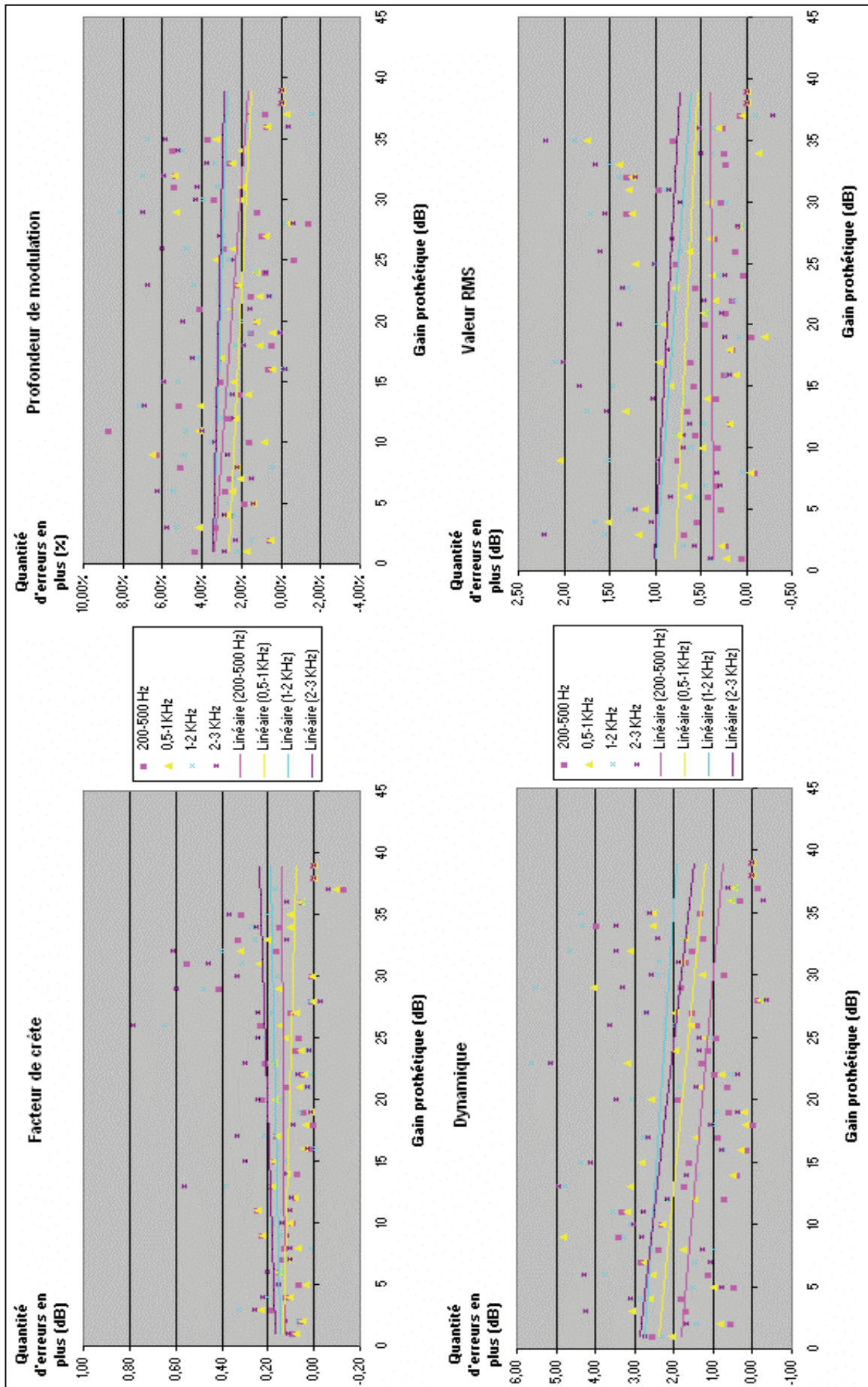


Figure 37 : Corrélation entre le total des erreurs d'enveloppe temporelle et le gain prothétique.

On peut remarquer que les résultats sont assez mitigés : bien sûr les erreurs diminuent lorsque les appareils sont portés (les points sont en majorité au dessus de l'axe des abscisses), mais aucun paramètre ne semble sensible au gain prothétique.

6.3. Conclusions et discussions

Aucune conclusion ne peut être formulée sur cette étude. En effet, nous n'avons pas trouvé de calcul statistique adapté à notre recherche et aux valeurs numériques obtenues avec l'ATEC.

De plus, pour plus de rigueur, il aurait été souhaitable de mesurer le gain prothétique tonal le jour où les tests ont été effectués.

Enfin les calculs de l'ATEC se font sur des bandes de fréquences alors que le gain prothétique tonal se mesure fréquence par fréquence. Peut-être serait-il plus judicieux de mesurer le gain prothétique sur les mêmes bandes de fréquences que l'ATEC avec l'aide de la mesure in-vivo par exemple.

Conclusion générale

Il est incontestable aujourd'hui, et la bibliographie le démontre, que l'enveloppe temporelle joue un rôle majeur dans l'intelligibilité de la parole. Pourtant, elle est peu utilisée dans la pratique de l'audioprothèse par rapport aux paramètres fréquentiels.

A notre connaissance, l'ATEC est le premier outil qui étudie l'aspect temporel de la parole.

Ce mémoire a cependant permis de se rendre compte que les listes de vingt syllabes ne permettent pas d'obtenir des résultats d'enveloppes temporelles suffisamment reproductibles. Il serait préférable de les remplacer par les listes de quarante ou de soixante tri-syllabes. Cette modification augmentera la durée de test mais permettra d'obtenir des résultats plus fiables.

Nous avons aussi été étonnés de remarquer que les erreurs d'enveloppes temporelles sont plus reproductibles que les erreurs de traits acoustiques et articulatoires. Pourtant les listes ont été équilibrées en se basant sur la classification des traits acoustiques. Ceci démontre le rôle primordial de la syllabe par rapport au phonème.

En ce qui concerne la sensibilité aux différents types de surdité, l'ATEC est sensible aux surdités plates et aux surdités en pente de ski. Pour ce qui est de la surdité inversée, il faudra refaire ces tests avec plus de patients et peut-être réaliser une étude multicentrique.

La troisième étude de ce mémoire est consacrée à la sensibilité de l'ATEC au port des appareils de correction auditive. Cependant, suite à des problèmes de statistiques, nous ne pouvons pas donner de conclusion sur cet aspect de l'ATEC.

Nous pouvons simplement souligner le fait qu'il existe une part de hasard dans les réponses des patients, qui peuvent expliquer l'aspect aléatoire des sous-évaluations et surévaluations.

Aujourd'hui, l'ATEC est devenu un logiciel complet qui pourra être utilisé par les audioprothésistes (enveloppe temporelle et traits acoustiques) mais aussi par les orthophonistes (traits articulatoires). Cependant, il sera intéressant de l'améliorer afin de le rendre plus lisible. Cela demandera sûrement l'aide d'un informaticien.

Enfin nous attendons avec impatience les conclusions de la dernière étape du projet ATEC qui consistera à analyser les résultats du logiciel, afin d'améliorer les réglages des appareils.

Annexes

Annexe 1 : Code ATEC

Symbole de l'API	Code retenu pour la saisie
Voyelles	
/i/	i
/y/	y
/u/	u
/e/	e
/ø/	&
/o/	o
/a/	a
/ /	in
/õ/	on
/ã/	à
Consonnes	
/p/	p
/t/	t
/k/	k
/b/	b
/d/	d
/g/	g
/f/	f
/s/	s
/ʃ/	h
/v/	v
/z/	z
/ʒ/	je
/m/	m
/n/	n
/ /	gn
/r/	r
/l/	l
/j/	j

Annexe 2 : Résultats en enveloppe temporelle des combinaisons de deux listes

➤ Surévaluation des caractéristiques d'enveloppe temporelle

	C1	C2	C3	C4	C5	C6
FC Global	25,05%	29,05%	26,79%	28,87%	26,30%	26,32%
50-200 Hz	35,28%	31,25%	31,06%	31,53%	33,43%	32,48%
200-500 Hz	25,43%	32,61%	27,69%	30,73%	28,40%	27,39%
0,5-1 KHz	27,60%	30,99%	29,78%	29,98%	29,87%	29,33%
1-2 KHz	27,39%	33,43%	26,37%	27,65%	28,10%	33,11%
2-3 KHz	30,66%	32,96%	39,93%	30,19%	34,11%	39,06%
3-8 KHz	39,88%	32,98%	48,59%	36,58%	40,41%	45,04%

moyenne FC	30,18%	31,90%	32,89%	30,79%	31,52%	33,25%
-------------------	--------	--------	--------	--------	--------	--------

PMOD Global	32,18%	39,45%	38,99%	37,01%	36,57%	37,66%
50-200 Hz	42,04%	40,16%	45,68%	41,14%	42,62%	43,22%
200-500 Hz	35,65%	44,75%	42,93%	43,31%	40,14%	40,47%
0,5-1 KHz	34,20%	34,33%	38,44%	38,04%	35,16%	34,26%
1-2 KHz	35,91%	34,82%	32,76%	28,03%	37,16%	38,24%
2-3 KHz	26,82%	28,82%	36,98%	25,30%	32,51%	34,77%
3-8 KHz	28,35%	31,29%	36,08%	25,00%	34,76%	35,70%

moyenne PMOD	33,59%	36,23%	38,84%	33,97%	36,99%	37,76%
---------------------	--------	--------	--------	--------	--------	--------

DYN Global	36,63%	33,41%	37,76%	31,44%	34,94%	41,10%
50-200 Hz	42,00%	37,64%	42,89%	32,07%	41,34%	48,21%
200-500 Hz	34,53%	30,65%	34,12%	28,77%	32,67%	38,09%
0,5-1 KHz	32,62%	30,01%	30,80%	28,83%	31,29%	32,58%
1-2 KHz	30,51%	30,71%	33,00%	26,99%	33,07%	34,66%
2-3 KHz	30,03%	30,82%	34,55%	26,86%	33,26%	35,96%
3-8 KHz	29,60%	30,79%	35,01%	26,14%	32,39%	36,17%

moyenne DYN	33,70%	32,00%	35,45%	28,73%	34,14%	38,11%
--------------------	--------	--------	--------	--------	--------	--------

RMS Global	47,28%	32,78%	28,73%	46,30%	26,62%	35,65%
50-200 Hz	36,95%	30,77%	32,32%	39,59%	29,85%	29,64%
200-500 Hz	41,32%	34,90%	25,90%	38,66%	27,29%	36,42%
0,5-1 KHz	31,78%	28,32%	26,90%	28,83%	28,66%	29,53%
1-2 KHz	30,28%	33,06%	24,02%	28,62%	24,79%	33,16%
2-3 KHz	29,26%	25,98%	22,08%	28,40%	28,00%	20,66%
3-8 KHz	29,20%	31,28%	24,95%	29,00%	31,98%	23,69%

moyenne RMS	35,15%	31,01%	26,41%	34,20%	28,17%	29,82%
--------------------	--------	--------	--------	--------	--------	--------

moyenne de surévaluation	33,16%	32,79%	33,40%	31,92%	32,70%	34,73%
---------------------------------	--------	--------	--------	--------	--------	--------

➤ Sous-évaluation des caractéristiques d'enveloppe temporelle

	C1	C2	C3	C4	C5	C6
FC Global	25,55%	24,23%	28,38%	27,05%	27,24%	23,78%
50-200 Hz	29,37%	29,08%	35,03%	29,41%	31,59%	32,32%
200-500 Hz	23,58%	24,65%	31,19%	25,67%	27,93%	25,13%
0,5-1 KHz	28,22%	23,47%	29,20%	27,96%	25,30%	28,00%
1-2 KHz	21,31%	23,32%	25,10%	21,57%	26,26%	20,67%
2-3 KHz	28,04%	27,95%	26,91%	26,12%	30,94%	25,80%
3-8 KHz	42,08%	27,75%	36,87%	40,58%	30,12%	36,52%
moyenne FC	28,31%	25,78%	30,38%	28,34%	28,48%	27,46%
PMOD Global	26,58%	29,11%	28,41%	32,65%	28,01%	22,30%
50-200 Hz	31,10%	32,48%	33,56%	35,61%	30,74%	30,85%
200-500 Hz	27,17%	29,38%	31,24%	34,12%	28,55%	23,82%
0,5-1 KHz	35,23%	30,72%	40,36%	42,00%	33,70%	29,76%
1-2 KHz	36,81%	31,74%	34,31%	33,96%	32,63%	35,98%
2-3 KHz	34,35%	30,85%	31,19%	30,04%	33,07%	33,23%
3-8 KHz	33,00%	29,63%	30,89%	29,46%	32,38%	32,45%
moyenne PMOD	32,03%	30,56%	32,85%	33,98%	31,30%	29,77%
DYN Global	40,51%	36,26%	33,79%	38,31%	38,01%	34,69%
50-200 Hz	39,45%	35,46%	41,01%	40,17%	38,73%	36,91%
200-500 Hz	36,83%	35,08%	37,08%	38,91%	36,66%	33,36%
0,5-1 KHz	39,27%	31,24%	35,63%	36,76%	36,18%	32,66%
1-2 KHz	30,86%	25,76%	26,97%	25,32%	32,05%	27,00%
2-3 KHz	28,57%	28,06%	29,21%	25,67%	31,06%	28,33%
3-8 KHz	29,59%	28,09%	28,92%	28,05%	29,09%	28,95%
moyenne DYN	35,01%	31,42%	33,23%	33,31%	34,54%	31,70%
RMS Global	75,53%	46,32%	46,28%	63,59%	34,19%	66,85%
50-200 Hz	37,56%	28,09%	34,83%	36,33%	28,66%	35,31%
200-500 Hz	59,84%	38,12%	43,75%	50,78%	34,03%	56,71%
0,5-1 KHz	50,40%	33,32%	35,42%	44,11%	30,33%	45,74%
1-2 KHz	35,00%	26,03%	31,19%	36,26%	27,21%	29,96%
2-3 KHz	34,32%	32,26%	33,20%	33,83%	29,90%	34,96%
3-8 KHz	33,67%	27,71%	37,15%	29,16%	32,33%	37,10%
moyenne RMS	46,62%	33,12%	37,40%	42,01%	30,95%	43,81%
moyenne sous évaluation	35,49%	30,22%	33,47%	34,41%	31,32%	33,18%
moyenne enveloppe temporelle	34,32%	31,50%	33,43%	33,17%	32,01%	33,96%

Annexe 3 : Résultats en enveloppe temporelle des combinaisons de trois listes

➤ Surévaluation des caractéristiques d'enveloppe temporelle

	C7	C8	C9	C10
FC Global	19,50%	21,98%	19,99%	24,34%
50-200 Hz	21,97%	21,83%	26,35%	24,95%
200-500 Hz	21,59%	20,58%	23,48%	22,20%
0,5-1 KHz	17,19%	18,96%	24,07%	22,97%
1-2 KHz	24,35%	19,55%	25,08%	19,99%
2-3 KHz	18,96%	18,92%	31,26%	18,77%
3-8 KHz	31,02%	26,24%	44,39%	22,74%

moyenne FC	22,08%	21,15%	27,80%	22,28%
-------------------	--------	--------	--------	--------

	C7	C8	C9	C10
PMOD Global	20,90%	22,13%	27,07%	28,05%
50-200 Hz	26,97%	27,80%	32,74%	34,66%
200-500 Hz	24,34%	24,75%	31,22%	29,01%
0,5-1 KHz	22,76%	24,96%	22,50%	29,24%
1-2 KHz	18,50%	16,30%	28,44%	24,71%
2-3 KHz	16,74%	13,16%	31,49%	17,10%
3-8 KHz	14,30%	16,73%	32,05%	20,65%

moyenne PMOD	20,64%	20,83%	29,36%	26,21%
---------------------	--------	--------	--------	--------

	C7	C8	C9	C10
DYN Global	20,33%	18,93%	30,43%	21,99%
50-200 Hz	25,55%	25,51%	31,68%	32,72%
200-500 Hz	20,25%	19,13%	25,91%	25,70%
0,5-1 KHz	23,43%	20,44%	26,65%	23,12%
1-2 KHz	22,42%	19,54%	32,48%	16,88%
2-3 KHz	17,18%	15,57%	33,83%	15,61%
3-8 KHz	13,61%	13,33%	34,63%	14,78%

moyenne DYN	20,40%	18,92%	30,80%	21,54%
--------------------	--------	--------	--------	--------

	C7	C8	C9	C10
RMS Global	28,75%	30,52%	25,55%	35,55%
50-200 Hz	26,67%	25,56%	26,03%	27,58%
200-500 Hz	22,28%	24,43%	24,44%	28,54%
0,5-1 KHz	22,17%	22,95%	21,07%	24,30%
1-2 KHz	15,96%	17,87%	24,52%	16,72%
2-3 KHz	23,03%	26,66%	16,58%	28,87%
3-8 KHz	22,04%	25,97%	21,57%	25,05%

moyenne RMS	22,99%	24,85%	22,82%	26,66%
--------------------	--------	--------	--------	--------

moyenne de surévaluation	21,53%	21,44%	27,70%	24,17%
---------------------------------	--------	--------	--------	--------

➤ Sous-évaluation des caractéristiques d'enveloppe temporelle

	C7	C8	C9	C10
FC Global	16,32%	20,69%	24,53%	20,43%
50-200 Hz	19,63%	21,01%	23,71%	19,87%
200-500 Hz	13,94%	16,63%	23,26%	20,39%
0,5-1 KHz	17,93%	20,57%	23,21%	20,00%
1-2 KHz	18,79%	20,50%	18,50%	23,31%
2-3 KHz	28,34%	25,53%	21,10%	22,89%
3-8 KHz	32,59%	20,41%	25,57%	22,87%

moyenne FC	21,07%	20,76%	22,84%	21,39%
-------------------	--------	--------	--------	--------

PMOD Global	21,22%	25,53%	24,14%	20,70%
50-200 Hz	19,25%	22,60%	23,42%	16,73%
200-500 Hz	18,65%	25,55%	28,98%	21,33%
0,5-1 KHz	22,99%	29,23%	31,32%	28,36%
1-2 KHz	20,20%	23,86%	24,74%	28,12%
2-3 KHz	25,25%	22,34%	25,71%	21,10%
3-8 KHz	18,45%	23,17%	19,33%	26,80%

moyenne PMOD	20,86%	24,61%	25,38%	23,30%
---------------------	--------	--------	--------	--------

DYN Global	33,11%	30,01%	29,93%	24,95%
50-200 Hz	28,69%	26,89%	27,97%	24,88%
200-500 Hz	28,76%	27,10%	26,71%	23,16%
0,5-1 KHz	28,07%	25,34%	33,46%	22,44%
1-2 KHz	21,64%	20,81%	24,39%	23,98%
2-3 KHz	19,99%	20,23%	25,19%	20,30%
3-8 KHz	18,96%	21,08%	20,57%	21,04%

moyenne DYN	25,60%	24,49%	26,89%	22,96%
--------------------	--------	--------	--------	--------

RMS Global	28,76%	38,00%	50,59%	38,36%
50-200 Hz	24,22%	26,39%	21,11%	28,34%
200-500 Hz	25,85%	30,14%	42,92%	32,09%
0,5-1 KHz	22,59%	25,54%	33,55%	25,09%
1-2 KHz	25,82%	20,61%	25,01%	18,38%
2-3 KHz	23,75%	20,59%	28,45%	15,85%
3-8 KHz	21,46%	17,82%	34,52%	16,42%

moyenne RMS	24,64%	25,59%	33,74%	24,93%
--------------------	--------	--------	--------	--------

moyenne sous évaluation	23,04%	23,86%	27,21%	23,15%
--------------------------------	--------	--------	--------	--------

moyenne enveloppe temporelle	22,29%	22,65%	27,45%	23,66%
-------------------------------------	--------	--------	--------	--------

Annexe 4 : Résultats des traits acoustiques et articulatoires des combinaisons de deux listes

➤ Traits acoustiques :

	C1	C2	C3	C4	C5	C6
Grave	30,71%	32,92%	23,82%	24,44%	32,50%	30,53%
Aigue	35,46%	33,09%	44,57%	30,50%	43,60%	38,23%
Compact	37,90%	33,84%	34,18%	35,31%	37,92%	32,24%
Diffus	27,61%	30,34%	26,23%	25,21%	28,48%	30,59%
Oral	40,18%	56,35%	51,47%	54,80%	51,83%	41,25%
Nasal	30,86%	24,51%	30,26%	26,65%	29,74%	29,73%
Vocal	71,51%	87,17%	81,31%	89,89%	88,08%	62,02%
Non Vocal	47,58%	50,30%	44,11%	57,71%	44,43%	37,94%
Continu	46,20%	44,54%	52,32%	39,35%	51,68%	52,60%
Interrompu	62,90%	45,22%	52,92%	56,00%	53,11%	50,59%
Sourd	49,84%	44,67%	47,69%	48,70%	47,32%	46,68%
Sonore	115,69%	103,34%	104,80%	87,68%	103,34%	132,81%
<hr/>						
Acuité fréquentielle	16,51%	17,99%	17,48%	16,42%	17,21%	18,20%
Acuité temporelle	33,52%	32,59%	38,19%	33,46%	36,25%	34,16%
<hr/>						
moyenne traits acoustiques	46,18%	45,49%	46,38%	44,72%	47,53%	45,54%

➤ Traits articulatoires des consonnes :

Occlusives	48,40%	43,01%	37,63%	36,70%	45,89%	46,40%
Constrictives	39,26%	35,07%	49,27%	34,94%	44,32%	44,63%
Nasales	55,20%	51,85%	54,69%	55,85%	52,13%	53,38%
Orales	54,13%	51,12%	50,65%	51,13%	51,90%	52,69%
Voisées	115,69%	103,34%	104,80%	87,68%	103,34%	132,81%
Non voisées	49,84%	44,67%	47,69%	48,70%	47,32%	46,68%
Bilabial	35,33%	33,82%	29,19%	34,54%	34,13%	29,91%
Labio-dental	25,56%	35,64%	39,76%	33,97%	33,60%	34,19%
Dental / Alvéolaire	35,62%	25,71%	27,76%	25,62%	31,12%	31,97%
Post-alvéolaire	62,90%	42,27%	58,71%	44,15%	52,92%	66,81%
Vélaire	47,21%	40,44%	37,34%	46,10%	46,29%	32,13%
Latéral	53,90%	60,52%	56,77%	48,84%	60,98%	61,38%
<hr/>						
Mode d'articulation	32,15%	26,99%	36,37%	27,43%	34,11%	33,92%
Nasalité	44,02%	41,38%	36,27%	40,36%	38,53%	43,07%
Source sonore	53,11%	45,52%	47,36%	47,97%	49,76%	48,59%
Lieu d'articulation	20,90%	19,30%	16,87%	16,82%	20,61%	19,56%
<hr/>						
moyenne traits articulatoires des consonnes	48,33%	43,79%	45,70%	42,55%	46,68%	48,63%

➤ Traits articulatoires des voyelles :

Nasales	31,70%	27,37%	32,37%	29,80%	30,02%	30,98%
Orales	42,85%	68,12%	57,73%	68,12%	51,18%	49,40%
Arrondies	43,06%	49,19%	54,16%	48,07%	43,83%	55,04%
Non arrondies	31,55%	34,80%	29,63%	30,87%	28,05%	37,35%
Fermées	39,49%	34,66%	34,93%	41,23%	36,09%	32,19%
Mi-fermées	35,03%	38,45%	24,96%	28,36%	37,02%	32,76%
Ouvertes	36,05%	45,72%	45,16%	44,97%	38,33%	43,63%
Antérieures	42,43%	44,67%	55,49%	42,51%	53,86%	46,36%
Postérieures	28,53%	27,76%	28,97%	28,13%	31,11%	26,64%
Aigu	30,25%	36,45%	40,36%	34,88%	40,01%	32,88%
Grave	37,52%	42,31%	40,16%	36,16%	42,23%	40,40%
Tendu ++	39,49%	34,66%	34,93%	41,23%	36,09%	32,19%
Tendu +	37,30%	43,14%	38,22%	39,59%	39,69%	39,85%
Tendu -	32,41%	33,93%	25,44%	28,39%	33,82%	30,01%
Tendu --	36,05%	45,72%	45,16%	44,97%	38,33%	43,63%
Nasalité	25,11%	31,49%	31,77%	32,31%	28,18%	27,09%
Labialisation	23,80%	30,65%	31,58%	29,86%	22,94%	33,03%
Degré d'aperture	23,13%	25,59%	19,01%	22,08%	24,31%	21,16%
Lieu d'articulation	26,83%	23,97%	28,09%	23,68%	29,10%	26,08%
Fréquence	25,47%	28,28%	31,26%	28,53%	30,21%	26,27%
Tension	20,83%	23,64%	18,50%	20,69%	22,14%	20,27%
moyenne traits articulatoires des voyelles	32,80%	36,69%	35,61%	35,45%	35,07%	34,63%

Annexe 5 : Résultats des traits acoustiques et articulatoires des combinaisons de trois listes

➤ Traits acoustiques :

	C7	C8	C9	C10
Grave	23,52%	27,48%	27,34%	22,60%
Aigue	24,47%	21,20%	38,01%	24,76%
Compact	23,19%	26,77%	30,66%	30,38%
Diffus	20,63%	19,48%	23,21%	14,19%
Oral	30,69%	37,41%	37,54%	28,41%
Nasal	26,08%	21,61%	28,16%	21,22%
Vocal	46,99%	62,61%	62,66%	63,47%
Non Vocal	34,81%	35,04%	38,05%	35,84%
Continu	23,98%	26,01%	48,79%	28,61%
Interrompu	38,89%	37,22%	38,89%	42,24%
Sourd	38,24%	34,86%	33,12%	33,57%
Sonore	85,52%	57,57%	59,72%	105,37%

Acuité fréquentielle	12,21%	13,79%	13,37%	12,41%
Acuité temporelle	21,27%	20,96%	29,24%	20,95%

moyenne traits acoustiques	32,18%	31,57%	36,34%	34,57%
-----------------------------------	--------	--------	--------	--------

➤ Traits articulatoires des consonnes :

Occlusives	28,74%	31,58%	27,60%	38,85%
Constrictives	22,87%	26,68%	43,28%	28,15%
Nasales	38,57%	37,37%	30,45%	37,52%
Orales	35,23%	38,26%	50,81%	34,11%
Voisées	85,52%	57,57%	59,72%	105,37%
Non voisées	38,24%	34,86%	33,12%	33,57%
Bilabial	34,22%	32,47%	21,96%	21,80%
Labio-dental	19,10%	20,20%	27,71%	18,55%
Dental / Alvéolaire	22,28%	19,53%	26,04%	20,80%
Post-alvéolaire	31,09%	33,10%	55,16%	31,63%
Vélaire	37,26%	40,12%	29,18%	40,28%
Latéral	32,41%	41,73%	47,14%	48,77%

Mode d'articulation	15,04%	18,35%	24,60%	23,47%
Nasalité	24,15%	26,52%	31,04%	23,45%
Source sonore	38,22%	35,36%	36,31%	36,53%
Lieu d'articulation	14,08%	16,25%	14,08%	15,14%

moyenne traits articulatoires des consonnes	32,31%	31,87%	34,89%	34,87%
--	--------	--------	--------	--------

➤ Traits articulatoires des voyelles :

Nasales	24,94%	23,87%	26,51%	27,99%
Orales	40,52%	62,30%	36,63%	50,82%
Arrondies	35,41%	26,76%	31,79%	28,26%
Non arrondies	23,83%	22,89%	24,50%	21,17%
Fermées	29,72%	31,96%	20,50%	36,20%
Mi-fermées	29,63%	31,07%	21,15%	27,29%
Ouvertes	33,10%	34,35%	38,11%	31,16%
Antérieures	32,59%	27,89%	49,77%	22,81%
Postérieures	28,32%	31,18%	19,38%	29,16%
Aigu	25,67%	22,95%	32,73%	23,62%
Grave	35,18%	37,88%	30,48%	34,98%
Tendu ++	29,72%	31,96%	20,50%	36,20%
Tendu +	30,52%	33,28%	30,52%	27,16%
Tendu -	28,28%	29,63%	26,98%	26,76%
Tendu --	33,10%	34,35%	38,11%	31,16%

Nasalité	23,57%	22,92%	22,45%	23,76%
Labialisation	19,33%	17,93%	15,94%	14,97%
Degré d'aperture	18,22%	21,45%	11,28%	20,37%
Lieu d'articulation	19,43%	19,64%	23,31%	21,48%
Fréquence	20,31%	21,16%	19,55%	23,17%
Tension	15,77%	17,97%	11,63%	16,99%

moyenne traits articulatoires des voyelles	27,48%	28,73%	26,28%	27,40%
--	--------	--------	--------	--------

Annexe 6 : CD

➤ ATEC définitif

➤ ATEC_v1_4

Index des graphiques et tableaux

Figure 1 : Anatomie de l'appareil phonatoire.....	8
Figure 2 : Modification du spectre d'un son par son passage dans un résonateur	10
Figure 3 : Oscillogramme.....	15
Figure 4 : Spectre.....	15
Figure 5 : Spectrogramme.....	16
Figure 6 : Sonagramme en 3D.....	16
Figure 7 : Oscillogramme de « Kenavo ».....	17
Figure 8 : Traits articulatoires : arrondi / non arrondi.....	37
Figure 9 : Traits articulatoires des voyelles.....	38
Figure 10 : Traits articulatoires des consonnes.....	40
Figure 11: Liste erronée.....	41
Figure 12 : Liste enregistrée.....	41
Figure 13 : Tableau de calcul d'erreurs pour les traits acoustiques.....	42
Figure 14 : Histogramme récapitulatif des erreurs de traits acoustiques.....	42
Figure 15 : Tableau récapitulatif des erreurs de traits acoustiques.....	42
Figure 16 : Résultats du test phonétique pour la reproductibilité de l'ATEC.....	47
Figure 17 : Explication des calculs du coefficient de variation.....	48
Figure 18 : Coefficients de variation des paramètres d'enveloppe temporelle des sept listes.....	49
Figure 19 : Coefficients de variation des paramètres d'enveloppe temporelle des combinaisons de deux listes.....	51
Figure 20 : Les trois nouvelles listes.....	52
Figure 21 : Coefficients de variation des paramètres d'enveloppe temporelle des combinaisons de trois listes.....	53

Figure 22 : Les deux nouvelles listes.....	53
Figure 23 : Corrélation Moyenne / Ecart types.....	54
Figure 24 : Coefficients de variation des traits acoustiques et articulatoires des sept listes.....	55
Figure 25 : Coefficients de variation des traits acoustiques et articulatoires des combinaisons de deux listes.....	56
Figure 26 : Coefficients de variation des traits acoustiques et articulatoires des combinaisons de trois listes.	57
Figure 27 : Principe du test de carence d'audibilité.....	58
Figure 28 : Intensités de test pour la sensibilité de l'ATEC à l'audiogramme tonal	60
Figure 29 : Résultats du test syllabique pour la sensibilité de l'ATEC à l'audiogramme tonal	60
Figure 30 : Surévaluation des enveloppes temporelles lors de la carence d'audibilité	62
Figure 31 : Sous-évaluation des enveloppes temporelles lors de la carence d'audibilité	63
Figure 32 : Total des erreurs d'enveloppe temporelle lors de la carence d'audibilité	64
Figure 33 : Comparaison des trois bandes de fréquences les plus aiguës avec les trois bandes de fréquences les plus graves.	68
Figure 34 : Résultats pour les surdités plates et en pente de ski.....	70
Figure 35 : Surévaluation des enveloppes temporelles lors de la carence d'audibilité (deux bandes de fréquences).....	72
Figure 36 : Sous-évaluation des enveloppes temporelles lors de la carence d'audibilité (deux bandes de fréquences).....	73
Figure 37 : Total des erreurs d'enveloppe temporelle lors de la carence d'audibilité (deux bandes de fréquences).....	74

Figure 38 : Comparaison des bandes de fréquences 50-1000 Hz et 1-8 KHz	76
Figure 39 : Comparaison des bandes de fréquences 50-1000 Hz et 1-8 KHz pour les surdités plates et en pente de ski	76
Figure 40 : Résultats du test syllabique pour la sensibilité de l'ATEC au port des appareils	80
Figure 41 : Corrélation entre la surévaluation des enveloppes temporelles et le gain prothétique	82
Figure 42 : Corrélation entre la sous-évaluation des enveloppes temporelles et le gain prothétique	83
Figure 43 : Corrélation entre le total des erreurs d'enveloppe temporelle et le gain prothétique	84

Bibliographie

- [1] **ADAM A.** : Le test syllabique égalisé ou non égalisé en intensité : étude comparative dans le silence et dans le bruit ; Mémoire d'audioprothèse 2006
- [2] **ARRIGONI A.** : Elaboration et évaluation du test syllabique ; mémoire d'audioprothèse 2005
- [3] **CHÂTEAU C.** : Etablissement d'un répertoire d'enveloppes temporelles syllabiques du français ; Mémoire d'audioprothèse 2005
- [4] **Collège National d'Audioprothèse** : Précis d'audioprothèse – L'appareillage de l'adulte – Tome 1
- [5] **DELATTRE P. C.** : Les indices acoustiques de la parole ; *Phonetica* 1, 2 – 1958
- [6] **DELGUTTE B., HAMMOND B.** : traitement de la parole par le système auditif ; les cahiers de l'audition – vol 10 n°4 – Juillet/Août 1997
- [7] **DEGOVE F., HUGON B., GUERRA L. et AVAN P.** : Mesure du taux de compression réel par analyse spectrale d'un signal modulé en amplitude ; Les Cahiers de l'Audition – Vol 10 – N°6 – Nov/Déc 1997
- [8] **GANTHIER M.** : Etude des confusions de syllabes chez les enfants et les adultes implantés cochléaires ; Mémoire d'orthophonie 2006

- [9] **HESS G.** : Programmation des seuils liminaires de l'implant cochléaire Med-El Tempo+ ; Mémoire d'audioprothèse 2002
- [10] **HILAIRE S.** : Contribution à l'étude du spectre à long terme de la parole ; Mémoire d'audioprothèse 2000
- [11] **HODGSON W.R.** et **SKINNER P.H.** : Hearing Aid Assessment and Use in Audiologic Habilitation.
- [12] **LEFEVRE F.** : Etude comparative des tests phonétiques de J.C. Lafon et de J.P. Dupret ; Mémoire d'audioprothèse 1982
- [13] **LEFEVRE F.** : Une méthode d'analyse auditive des confusions phonétiques : La confrontation indiciaire ; Thèse 1985
- [14] **LEFEVRE F., KATONA E.** et **LAURENT S.** : Enveloppe Temporelle de la Parole ; Les Cahiers de l'audition – Vol 17 – N°4 – Juillet/Août 2004
- [15] **LEFEVRE F.** et **RENARD C.** : Appareils numériques et compression aux basses intensités. Incidence sur l'intelligibilité – Les Cahiers de l'Audition – Vol 12 n°4 – Juillet/Août 1999
- [16] **LEMESLE P.** : Audivox, AVfS, AVfB, Test Cochléaire et Test Syllabique : étude comparative de tests vocaux dans le silence et dans le bruit ; Mémoire 2005
- [17] **LOCHON G.** : Recherche des invariants d'enveloppe temporelle des syllabes du français ; Mémoire 2007
- [18] **LORENZI C.** et **APOUX F.** : Importance du traitement temporel des informations auditives ; Les Cahiers de l'Audition – Vol 13 - N°4 – Juillet/Août 2000

- [19] **LORENZI C. et APOUX F.** : les indices acoustiques dans le signal de parole ; Audio Infos – n°69 – Mars 2003
- [20] **MARQUE C.** : L'appareil phonatoire (présentation sommaire des organes de la parole) ; <http://lesla.univ-lyon2.fr/IMG/pdf/doc-284.pdf>
- [21] **SOUETRE P.** : Création d'un logiciel de comparaison d'enveloppes temporelles syllabiques ; Mémoire d'audioprothèse 2006
- [22] **SPIEGEL M. R.** : Statistique ; Ed EdiScience 2002
- [23] **TOUBON V.** : Un modèle phonétique de répartition fréquentielle des électrodes dans l'implant cochléaire Med-El Tempo+; Mémoire d'audioprothèse 2004
- [24] **UNIVERSITE DE LAUSANNE** : Brève description de l'appareil phonatoire ; www.unil.ch/ling/page13431.html
- [25] **UNIVERSITE DE LEON** : Phonétique française – F.L.E. ; www3.unileon.es/dp/dfm/flenet/phon/phoncours.html
- [26] **VIROLE B.** : Phonétique acoustique appliquée en audioprothèse; benoitvirole.com - 1999