

Stage de 2e année de Master / Projet de fin d'études Année universitaire 2015 - 2016

Mesure psychoacoustique de discrimination de l'intensité sonore : Influence du contexte

Victor ROSI

15 Août 2016

Encadrement

M. Olivier MACHEREY

macherey @lma.cnrs-mrs.fr

Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique (CNRS) Equipe Sons CNRS - UPR 7051 4 impasse Nikola Tesla CS 40006 13453 Marseille Cedex 13

"Every act of perception is to some degree an act of creation, and every act of memory is to some degree an act of imagination."

- Oliver SACKS, Musicophilia : Tales of Music and the Brain -

Remerciements

Je remercie très chaleureusement mon encadrant Olivier MACHEREY, pour m'avoir proposé ce sujet, qui a amené une belle réflexion sur la perception des sons. Son enthousiasme, sa curiosité et son exigence vis-à-vis des thèmes abordés lors de ce stage m'ont énormément inspiré. Sa passion et la grande qualité de son encadrement m'ont fait découvrir un côté *épique* de la recherche que j'ai trouvé très stimulant.

Je souhaite également remercier Sabine MEUNIER qui en plus d'être une personne formidablement sympathique, a su m'aider et me conseiller à chaque étape de la confection de mes expériences. Je lui suis reconnaissant de s'être investit dans ce stage, stimulant encore plus cette étude. Je regrette de lui avoir infligé à plusieurs reprises de passer les tests psychoacoustiques, tout en espérant que son amour pour cette science lui permettra de me pardonner.

Un grand merci à Gaston HIKHUYSEN pour m'avoir montré que la recherche c'est avant tout une chance et le plaisir d'apprendre et communiquer son savoir. Je lui doit bien entendu de m'avoir donner le code "squelette" de toutes mes expériences. Enfin étant mon compagnon de bureau je le remercie pour sa bonne humeur et ses longues explications riches en informations.

Merci à Jacques CHATRON, sa fraicheur, son enthousiasme constant et son incroyable bonne humeur communicative. Merci pour tout ce partage musical, pour ces longues discussions autour de musique d'opéra, symphonique, de jazz ou pop. Son incroyable savoir de mélomane associé à des talents d'ingénieur en fait une personnalité d'exception.

Je remercie également Quentin MESNILDREY, qui arrive au terme de l'aventure fascinante qu'est la thèse avec courage et détermination. Sa gentillesse, ses encouragements et son humour ont été un atout pendant ce stage.

Merci à Guy RABAU, pour son apport journalier de bonne humeur et de blagues qui ont la qualité de toujours faire mouchent.

J'adresse également mes remerciements à Sophie SAVEL dont j'ai pu apprécier la grande générosité pendant ces 6 mois. C'est aussi la première personne qui m'a accueilli au laboratoire.

Merci à Michel LAURENT qui en plus d'avoir subit avec persévérance la difficile étape de signature de ma convention de stage, a été d'une gentillesse formidable. j'apprécie le fait d'avoir pu la rencontrer, alors qu'elle arrive au terme de son aventure au LMA.

Enfin je remercie toutes les personnes que j'ai rencontré au LMA qui sans exception ont fait preuve de gentillesse et de sympathie à mon égare. Je pense que la vie Marseillaise rend chaque personne plus curieuse et plus enthousiaste, et c'est peut-être ce que j'ai appris de plus important.

Résumé

Ce rapport présente une étude de 5 mois effectuée au sein de l'équipe Sons du Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique dans le cadre d'un mémoire pour le master ATIAM. Ce projet est né de la volonté de comprendre les processus mis en oeuvre par le système auditif pour percevoir les fluctuations d'amplitude dans l'intensité sonore. Des études précédentes ont observées une adaptation de la gamme dynamique de la fonction Entrée/Sortie des neurones dans le colliculus inférieur (Dean et al., 2005) et dans le nerf auditif (Wen et al., 2009) chez des petits mammifères. Ce phénomène permet au système auditif de s'adapter à un niveau sonore ambiant ,et pourrait ainsi améliorer la précision de la perception, notamment lors d'un exercice de discrimination d'intensité. Cette adaptation peut être une explication au *Dynamic range problem* (c.f. I.2.2). Notre travail avait pour objectif de mettre en évidence cette adaptation du système auditif à l'aide d'un test

psychoacoustique. La conception du test a pris en compte les résultats étudiés dans la littérature, proposant une tâche de détection de modulation sur un son pur précédé d'un son précurseur (un bruit à bande-étroite). Nous avons mesuré l'influence du niveau sonore du précurseur et sa position relative à la cible sur les performances du sujet dans différentes conditions. Cette expérience n'a pas délivré de résultats permettant de conclure.

Nous nous sommes inspiré du paradigme de Dean et al. (2005) pour concevoir un second stimulus et construire un nouveau test. Nous avons conçu un stimulus composé de sons purs de même fréquence, concaténés d'une durée de 200 ms chacun. Une modulation d'amplitude à détecter était appliquée sur l'un de ces intervalles. Le niveau sonore d'un stimulus variait au fil des échantillons de sons purs, suivant différentes distributions. Nous avons pu observer un effet de l'adaptation classique des neurones à un niveau sonore moyen qui est différent de l'adaptation de la gamme dynamique rapportée par Dean et al. (2005). Il n'apparait donc pas évident qu'un tel phénomène améliore la perception des fluctuations d'amplitude.

Abstract

This report presents experiments done during a five-months internship at the 'Sound group' of the Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique (Marseille), as part of a master thesis. We focused on the auditory processing involved in the perception of intensity fluctuations. Previous physiological studies have reported a dynamic range adaptation for rate level functions of neurons in the inferior colliculus (Dean et al., 2005) and the auditory nerve (Wen et al., 2009) in small mammals. The mechanism adapts the auditory system to the ambient sound levels, which could improve precision in intensity discrimination. It possibly provides an explanation for the Dynamic range problem (c.f I.2.2).

The current work aims to demonstrate dynamic range adaptation with a psychophysical listening test. In a first experiment, listener detect a modulation imposed on a pure tone preceded by a narrow band noise. We measured whether noise level and timing relative to the pure tone influenced modulation detection thresholds. Results did not provide a conclusive answer.

In a second experiment we presented several concatenated pure tones with fixed frequency. An amplitude modulation was applied on one of them. Presentation levels across concatenated pure tones varied following different distributions. Again subjects had to detect the modulated tone. We could observe an effect of classic firing rate adaptation of neurons, which is different from the one reported by Dean et al. (2005). We found no evidence for dynamic range adaptation to improve the detection of intensity fluctuations.

Mots-Clés : Perception auditive, Psychoacoustique, Codage de l'intensité sonore, Test perceptif, Effet de contexte, Dynamic range problem.

Table des matières

T	Inti	roduction	3
	1	Présentation du LMA	3
	2	Introduction à la perception de l'intensité	3
		2.1 Quelques définitions	3
		2.1.1 La Sonie	3
		2.1.2 Discrimination de l'intensité sonore et Loi de Weber	4
		2.2 Le Dynamic range problem	5
2	Eta	at de l'art	7
_	1	Mise en évidence d'une adaptation de gamme dynamique	7
		1.1 Nature de l'adaptation au niveau neuronal	7
		1.2 Echelle de temps de cette adaptation	8
		1.3 Hypothèse supplémentaires et Mécanismes responsables de l'adaptation au niveau sonore	9
	2	Quelques conséquences à l'effet de contexte en perception auditive	9
		2.1 L'adaptation au niveau sonore moven comme explication au Loudness enhancement	9
		2.2 La compression de l'intensité sonore effacée par l'adaptation du système auditif à un	
		niveau sonore moyen	10
		2.3 Apprentissage perceptuel du système auditif pour le codage de l'intensité	11
	3	Démarche et Organisation	12
		3.1 Déroulement du projet	12
		3.2 Principe de la mesure	12
		3.3 Matériel et conditions de mesures	12
	Б		
3	Exr	périence n°1 : Effet d'un son précurseur sur les seuils de détection de modulation	13
3	Exp 1	périence n°1 : Effet d'un son précurseur sur les seuils de détection de modulation Définition & Méthodes	13 13
3	Exp 1 2	périence n°1 : Effet d'un son précurseur sur les seuils de détection de modulation Définition & Méthodes	13 13 13
3	Exp 1 2 3	périence n°1 : Effet d'un son précurseur sur les seuils de détection de modulation Définition & Méthodes	13 13 13 14
3	Exp 1 2 3	périence n°1 : Effet d'un son précurseur sur les seuils de détection de modulation Définition & Méthodes	13 13 13 14 14
3	Exp 1 2 3	périence n°1 : Effet d'un son précurseur sur les seuils de détection de modulation Définition & Méthodes	13 13 13 14 14 16
3	Exp 1 2 3	périence n°1 : Effet d'un son précurseur sur les seuils de détection de modulation Définition & Méthodes	13 13 13 14 14 16 16
3	Exp 1 2 3	périence n°1 : Effet d'un son précurseur sur les seuils de détection de modulation Définition & Méthodes Nature du Stimulus Présentation de la méthode 3.1 Définition : Procédure Adaptative 3.2 Procédure : Single Interval Adjustment-Matrix 3.3 Organisation du protocole 3.1 Phase d'entraînement	13 13 13 14 14 16 16 16
3	Exp 1 2 3	périence n°1 : Effet d'un son précurseur sur les seuils de détection de modulation Définition & Méthodes	13 13 13 14 14 16 16 16 16
3	Exp 1 2 3	périence n°1 : Effet d'un son précurseur sur les seuils de détection de modulation Définition & Méthodes Nature du Stimulus Présentation de la méthode 3.1 Définition : Procédure Adaptative 3.2 Procédure : Single Interval Adjustment-Matrix 3.3 Organisation du protocole 3.3.1 Phase d'entraînement 3.3.2 Tâche Principale Analyse des résultats de l'expérience n°1	13 13 13 14 14 16 16 16 16 16 18
3	Exp 1 2 3	périence n°1 : Effet d'un son précurseur sur les seuils de détection de modulation Définition & Méthodes Nature du Stimulus Présentation de la méthode 3.1 Définition : Procédure Adaptative 3.2 Procédure : Single Interval Adjustment-Matrix 3.3 Organisation du protocole 3.3.1 Phase d'entraînement 3.3.2 Tâche Principale 4.1 Hypothèses	13 13 14 14 16 16 16 16 18 18
3	Exp 1 2 3	périence n°1 : Effet d'un son précurseur sur les seuils de détection de modulation Définition & Méthodes Nature du Stimulus Présentation de la méthode 3.1 Définition : Procédure Adaptative 3.2 Procédure : Single Interval Adjustment-Matrix 3.3 Organisation du protocole 3.3.1 Phase d'entraînement 3.3.2 Tâche Principale 4.1 Hypothèses 4.2 Mise en forme des résultats	13 13 13 14 14 16 16 16 16 16 18 18 18
3	Exp 1 2 3	périence n°1 : Effet d'un son précurseur sur les seuils de détection de modulation Définition & Méthodes Nature du Stimulus Présentation de la méthode 3.1 Définition : Procédure Adaptative 3.2 Procédure : Single Interval Adjustment-Matrix 3.3 Organisation du protocole 3.3.1 Phase d'entraînement 3.3.2 Tâche Principale 4.1 Hypothèses 4.2 Mise en forme des résultats 4.3 Analyse des résultats bruts et ANOVA	13 13 13 14 14 16 16 16 16 16 16 18 18 18 18
3	Exp 1 2 3	périence n°1 : Effet d'un son précurseur sur les seuils de détection de modulation Définition & Méthodes	13 13 13 14 14 16 16 16 16 16 18 18 18 18 21
3	Exp 1 2 3 4 4	 périence n°1 : Effet d'un son précurseur sur les seuils de détection de modulation Définition & Méthodes	13 13 13 14 14 16 16 16 16 16 18 18 18 18 21 22
4	Exp 1 2 3 4 Exp 1	périence n°1 : Effet d'un son précurseur sur les seuils de détection de modulation Définition & Méthodes Nature du Stimulus Présentation de la méthode 3.1 Définition : Procédure Adaptative 3.2 Procédure : Single Interval Adjustment-Matrix 3.3 Organisation du protocole 3.3.1 Phase d'entraînement 3.3.2 Tâche Principale Analyse des résultats de l'expérience n°1 4.1 Hypothèses 4.2 Mise en forme des résultats 4.3 Analyse des résultats bruts et ANOVA 4.4 Conclusions de l'expérience périence n°2 : Influence du contexte sonore sur la détection de modulation Définition & Méthodes	13 13 13 14 14 16 16 16 16 16 18 18 18 18 21 22 22
4	Exp 1 2 3 4 Exp 1	périence n°1 : Effet d'un son précurseur sur les seuils de détection de modulation Définition & Méthodes Nature du Stimulus Présentation de la méthode 3.1 Définition : Procédure Adaptative 3.2 Procédure : Single Interval Adjustment-Matrix 3.3 Organisation du protocole 3.3.1 Phase d'entraînement 3.3.2 Tâche Principale Analyse des résultats de l'expérience n°1 4.1 Hypothèses 4.2 Mise en forme des résultats 4.3 Analyse des résultats bruts et ANOVA 4.4 Conclusions de l'expérience périence n°2 : Influence du contexte sonore sur la détection de modulation Définition & Méthodes 1.1 Nature du Stimulus	 13 13 13 14 14 16 16 16 16 16 16 18 18 18 21 22 22 22
4	Exp 1 2 3 4 Exp 1	 périence n°1 : Effet d'un son précurseur sur les seuils de détection de modulation Définition & Méthodes	 13 13 13 14 14 16 16 16 16 16 16 16 18 18 21 22 22 22 23
4	Exp 1 2 3 4 4 Exp 1	 périence n°1 : Effet d'un son précurseur sur les seuils de détection de modulation Définition & Méthodes	13 13 13 14 14 16 16 16 16 16 18 18 18 21 22 22 22 23 24
4	Exp 1 2 3 4 Exp 1	périence n°1 : Effet d'un son précurseur sur les seuils de détection de modulation Définition & Méthodes	 13 13 13 14 14 16 16 16 16 16 18 18 21 22 24 24

	2.1	Présentation des résultats	26
	2.2	Hypothèses	26
	2.3	Présentation et Analyse des seuils mesurés lors de la phase préliminaire	27
	2.4	Analyse des résultats bruts	28
	2.5	Mesure et Analyse des T_{50} : Etude du décalage des fonction psychométriques	31
		2.5.1 Resultats individuels	31
		2.5.2 Résultats globaux et Analyse de la variance	32
	2.6	Expression de l'interaction	34
	2.7	Proposition d'amélioration du protocole	35
5	Conclusion	n & Perspectives	36
Α	Calibratio	n du Casque Sennheiser HDA 200	37
в	Stimuli de	la première expérience	39
С	Instruction	ns expérience nº1	40
-			

Chapitre 1

Introduction

1 Présentation du LMA

Le LMA est une Unité Propre de Recherche du CNRS (UPR 7051) rattachée à l'Institut des Sciences de l'Ingénierie et des Systèmes (INSIS) et liée par convention dans le cadre du contrat quinquennal 2012-2016 à Aix-Marseille Université (AMU) et à Centrale Marseille (ECM). Il a pour objectif d'assurer le continuum Recherche fondamentale-Ingénierie-Technologie dans ses domaines d'expertise : l'Acoustique et la Mécanique des Solides.

Le stage a été effectué au sein de l'Equipe Sons du LMA du 2 Mars 2016 au 12 Août 2016. L'équipe Sons mène des recherches dans le domaine des fréquences audibles, de la production du son jusqu'à sa perception par l'être humain. L'équipe a ainsi développé un large spectre de compétences en vibroacoustique, aéroacoustique, audio, systèmes dynamiques, informatique temps-réel, psychoacoustique et neurosciences.

2 Introduction à la perception de l'intensité

Pour une majorité d'êtres vivants, la capacité de percevoir l'intensité sonore avec précision est indispensable pour pouvoir communiquer ou se repérer dans l'espace.

Ainsi, les sons que nous entendons au quotidien ont une intensité qui varie au cours du temps, comprise dans une certaine gamme dynamique. Pour les être humains, la possibilité de percevoir ces variations est essentielle, notamment pour l'intelligibilité de la parole ou l'appréciation de la musique.

L'être humain est capable de conserver une sensibilité aux variations d'intensité quasi-constante sur l'ensemble de la gamme dynamique audible (environ 100 dB), ce qui lui permet d'être performant pour reconnaître, localiser ou comprendre un large panel de sons ayant une intensité fluctuante.

2.1 Quelques définitions

2.1.1 La Sonie

La sonie est la grandeur psychoacoustique correspondant à la perception de l'intensité sonore, le phone est son unité (au même titre que le sone qui en est dérivé). A 1000 Hz un son de n dB SPL aura une sonie de n phones. Soit la fonction reliant la sonie au niveau de pression représentée sur la Fig.1.1. Les valeurs de la sonie sont indiquées en *phones* sur le graphe. Chaque courbe isosonique représente une égale perception de l'intensité (la valeur en phone est constante le long de chaque courbe). La courbe inférieure est le seuil absolu de perception, et la courbe la plus haute, le seuil de douleur. Ces courbes iso-soniques illustrent que deux sons ayant des niveaux de pression égaux n'ont pas nécessairement la même sonie.



FIGURE 1.1 – Graphe des courbes de niveaux isosoniques

2.1.2 Discrimination de l'intensité sonore et Loi de Weber

Le seuil de discrimination d'intensité (ou "Just noticeable difference", JND¹) correspond à la plus petite différence d'intensité qu'un sujet peut percevoir. Ce seuil peut être défini par **la fraction de Weber** (rapport de la différence d'intensité au seuil sur l'intensité de référence).

$$k = \frac{\Delta I}{I_{ref}} \tag{1.1}$$

k est la valeur de la fraction de Weber, ΔI est la plus petite différence d'intensité perçue et I_{ref} l'intensité de référence.

La loi de Weber suppose que sur une gamme dynamique allant de 20 dB à 100 dB au dessus du seuil de perception (courbe isosonique inférieur de la figure 1.1), le seuil de discrimination d'intensité en fonction de l'intensité de référence reste relativement constant pour un être humain dans la gamme audible d'intensité (30-100 dB SPL). Plusieurs études ont cependant observé que cette loi n'était pas valide et qu'il existait un biais dans la discrimination de sons purs appelé **"Near miss to Weber's law"**. Ce biais se caractérise par une décroissance de la fraction de Weber en fonction de l'intensité de référence dans le domaine des hautes intensités pour les sons purs. comme le montre la Figure 1.2.



FIGURE 1.2 – Discrimination d'intensité pour un bruit blanc (points blancs), et pour un son pur à 1000 Hz (points noirs), en fonction de l'intensité de référence

La figure 1.2 montre les résultats de deux études ayant mis en évidence cette décroissance (Miller(1947) et Viemester & Bacon(1988)). Dans ces études, les sujets devaient détecter un court incrément d'intensité imposé sur un son continu (pedestal). La variation de la fraction de Weber au seuil audible ($\leq 20 \text{ dB}$) pour les deux types de sons est similaire. Ils ont par contre observé, qu'entre 20 et 100 dB SPL, la capacité

^{1.} La plus petite différence d'intensité détectable dans une certaine configuration

de discrimination des sujets restait stable pour du bruit blanc mais continuait à diminuer pour un son pur. Autrement dit, l'être humain est meilleur pour détecter des petites différences d'intensité lorsque l'intensité du stimulus de référence est élevée. Ils ont également observé que la fraction de Weber présente une "bosse" au niveau des intensité moyennes pour le son pur ($\sim 40-60$ dB). En effet la courbe noire présente un changement de sa monotonie globale dans les intensités moyennes. Cette bosse correspond à une détérioration de la discrimination d'intensité dans cette partie de la gamme dynamique.

La façon dont est codée l'intensité au niveau neuronal a ouvert la voie à plusieurs hypothèses. Une première idée est de considérer que la sonie est proportionnelle au taux de décharges ² mesuré dans le nerf auditif. Les neurones du nerf auditif ont individuellement une gamme dynamique assez étroite. Nous définissons ici la *Fonction Entrée/Sortie* (Fonction E/S) d'un neurone, comme la fonction reliant le taux de décharges au niveau sonore. La Figure 1.3, présente un schéma de l'allure de la fonction E/S d'un neurone du nerf auditif (qui est à la périphérie du système auditif).



FIGURE 1.3 – Schéma d'une fonction E/S d'un neurone du nerf auditif d'un chat

2.2 Le Dynamic range problem

Une problématique bien connue, appelée *Dynamic range problem* rapporte une originalité du système auditif dans son traitement des intensités sonores. En voici une définition comme énoncée par Plack and Carlyon (1995). Le système auditif humain peut discriminer des sons d'intensités différentes sur une large gamme dynamique. Cependant, si l'on étudie la réponse des neurones du nerf auditif, on peut observer qu'ils ont, individuellement, une dynamique très étroite (voir Fig. 1.3). De plus, le taux de décharges d'une majorité de ces neurones tend à saturer rapidement en augmentant le niveau sonore au delà de 60 dB. Mais alors comment se fait-il que nous puissions détecter des variations d'intensité avec précision aussi bien pour des intensités élevées que pour des intensités faibles alors qu'une majorité des neurones périphériques sont sensés être saturés au delà de 60 dB? Ou inversement, comment se fait-il que nous ne soyons pas meilleurs pour détecter des différences d'intensité lorsque le niveau est faible?

Il est tout d'abord important de noter que les études qui ont permis de mettre en évidence cette saturation des neurones (périphériques ou centraux) à intensité élevée ont été réalisées chez des animaux anesthésiés (chat ou cobaye en général). De plus, les stimuli utilisés étaient des successions de sons de courte durée et espacés de silences, ce qui diffère grandement des sons de la vie de tous les jours.

Une série d'études récentes (Dean et al., 2005; Wen et al., 2009) a proposé que les neurones du système auditif des mammifères pouvaient "adapter" leur taux de décharges au niveau sonore moyen du stimulus. La mesure de cette adaptation de la gamme dynamique et ses implications pour la perception est l'objet des études présentées dans ce mémoire.

Bien que la proportionnalité de la sonie avec le taux de décharge soit grandement discutée (Relkin and Doucet, 1997), il existe une relation monotone entre le niveau sonore et le taux de décharges des neurones (Dean et al., 2005). Notre hypothèse de travail est que les variations de sonie sont codées par les variations du taux de décharge. Cette idée est implicitement présente dans la discussion de l'étude de Wang et al. (2015) (cf. 2.2.2). Pour reformuler cette hypothèse de travail, nous partons du postulat trivial que si l'être humain

^{2.} la quantité d'activité d'un neurone lors d'une excitation

est capable de faire la différence entre deux sons d'intensité différente, cela implique que les représentations neuronales de ces deux sons soient différentes. Par extension, nous nous attendons donc à ce que deux stimuli produisant des taux de décharge très différents soient plus facilement discriminables en intensité que deux stimuli produisant des taux de décharges similaires.

Chapitre 2

Etat de l'art

1 Mise en évidence d'une adaptation de gamme dynamique

1.1 Nature de l'adaptation au niveau neuronal

Deux études ont fait état d'une adaptation de la gamme dynamique des neurones du colliculus inférieur (Dean et al., 2005), et des fibres du nerf auditif (Wen et al., 2009), chez des petits mammifères. Le paradigme employé pour ces deux expériences était de présenter un bruit large-bande ou une sinusoïde dont le niveau sonore était mis à jour toutes les 50 ms, suivant la distribution présentée à la Fig. 2.1. Cette distribution englobe des niveaux compris entre 20 et 100 dB SPL avec un pas de 1 dB. Dans cette gamme, un intervalle centré autour d'une valeur moyenne, et d'une largeur de 12 dB (Fig. 2.1) est appelé *High Probability Region* (HPR). Les niveaux sonores contenus dans la HPR ont une probabilité d'apparition de 80%, tandis que les niveaux sonores en dehors de la HPR ont une probabilité d'apparition de 20%. Les auteurs ont présenté ces stimuli diotiquement aux animaux et ont mesuré la fonction E/S (taux de décharge des neurones en fonction du niveau sonore) de plusieurs neurones. En comparaison, la fonction E/S "classique" était obtenue en présentant des intervalles très courts (40-50 ms) de bruit blanc espacés de 300 ms chacun et pouvant prendre toutes les valeurs entre 20 et 100 dB SPL. Contrairement à la distribution présentée sur la Figure 2.1, la distribution était dans ce cas uniforme.



FIGURE 2.1 – Distribution de la probabilité de niveaux sonore d'un stimulus

Dean et al. (2005) et Wen et al. (2009) ont observé une adaptation de la gamme dynamique des neurones mesurés pour des distributions comprenant une HPR. Cette adaptation se traduit par un décalage horizontal de la Fonction E/S, symbolisé par la flèche rouge sur le schéma de la Fig. 2.2 lorsque la probabilité d'apparition des niveaux passe d'une distribution uniforme à une distribution avec HPR. La courbe noire représente la fonction E/S classique, mesurée avec une distribution de niveaux uniforme, et la courbe bleue représente la fonction E/S du même neurone pour une distribution avec une HPR centrée sur 60 dB SPL. Une conséquence potentielle de cette adaptation serait l'amélioration de la précision du codage de l'intensité par ces neurones dans la zone de plus grande probabilité d'apparition de ces niveaux (HPR).



FIGURE 2.2 – Schéma de l'adaptation des neurones à un stimulus dont la distribution comporte une HPR (zone jaune). Avec la fonction E/S de référence (courbe noire) et la fonction adaptée (courbe bleue) comme l'ont observé Dean et al. (2005) et Wen et al. (2009) pour les neurones du système auditif. L'adaptation de la gamme dynamique (flèche rouge) et l'adaptation classique du taux de décharge (flèche grise)

Les deux études décrites ci-dessus se sont appuyées sur la réponse d'une population de neurones individuels à ce stimulus centré sur des valeurs de niveau sonore différentes. Ils ont mesuré un décalage du seuil (ou point de fonctionnement) du neurone et de la gamme dynamique de la fonction E/S juste au niveau de cette région de grande probabilité (HPR). En plus de ce décalage, le taux de décharges tendait à diminuer lorsque le niveau moyen de la HPR augmentait. Cette diminution est illustrée par la flèche grise sur la Fig. 2.2, on parle d'adaptation classique du taux de décharge.

Wen et al. (2009) ont insisté sur le fait que l'adaptation de la gamme dynamique (flèche rouge), diffèrait de l'adaptation classique du taux de décharges (flèche grise). Avec un estimateur différent de celui de Dean et al. (2005), ils ont tenté de différencier ces deux types d'adaptation au niveau du nerf auditif. Ils ont retrouvé un comportement similaire à celui des neurones du colliculus inférieur mais avec une plus grande homogénéité pour leur population de neurones, et une amplitude d'adaptation de la gamme dynamique bien plus faible. En normalisant les fonction E/S pour s'émanciper de l'adaptation classique du taux de décharges, ils ont observé un décalage linéaire du point à 50% de chaque fonction, relativement au niveau moyen de la HPR.

Pour conclure l'adaptation de la gamme dynamique est observée à un niveau périphérique (nerf auditif) et à un niveau plus central (colliculus inférieur). La quantité d'adaptation est cependant plus faible au niveau du nerf auditif, ce qui laisse supposer que cet effet est initié à la périphérie et amplifié centralement.

1.2 Echelle de temps de cette adaptation

Deux études supplémentaires ont été conduites pour évaluer l'échelle de temps durant laquelle cette adaptation se produit. La constante de temps τ (temps pour lequel, lors de l'adaptation qui évolue de façon expontentielle, la fonction E/S est à 63 % de sa position finale), a été estimée, dans un premier temps, comme étant inférieure à 5 secondes. Dans le but d'obtenir une mesure plus précise de cette constante de temps, et, dans le même temps, d'évaluer les limites temporelles de cette adaptation, deux études supplémentaires ont été menées par les mêmes auteurs (Dean et al., 2008; Wen et al., 2012) faisant suite à celles exposées dans les paragraphes précédents. L'idée était de solliciter les neurones du colliculus inférieur et du nerf auditif avec un stimulus dont la HPR alternait toutes les 5 secondes entre deux valeurs de niveau sonore moyen relativement espacées ($\geq 20 \text{ dB}$). Lors de la transition d'un niveau faible à un niveau élevé, le taux de décharges augmentait abruptement puis se stabilisait en diminuant légèrement, l'exact inverse se produisait lors du passage d'un niveau élevé à un niveau faible. La valeur moyenne de τ a été mesurée à 160 ms.

Après un relevé de l'évolution de la fonction E/S, Dean et al. (2008) ont observé que l'adaptation au niveau sonore supérieur était plus rapide (~ 160 ms) que l'adaptation au niveau sonore inférieur (~ 330 ms). Dans le même temps, ils ont mis en évidence que le temps d'établissement de l'adaptation ne dépendait pas de la durée de chaque événement d'un stimulus. Ils ont enfin observé une dépendance de τ à la fréquence caractéristique (FC) de ces neurones (les neurones avec une FC plus élevée avaient tendance à montrer une adaptation plus rapide que les neurones avec une FC plus basse). Ainsi τ pouvait varier entre 100 ms et 500 ms des hautes fréquences aux basses fréquences de la gamme testée.

Dean et al. ont également observé une adaptation à bien plus long terme (de l'ordre de 12 secondes), qui ne semblait pas avoir de relation avec l'adaptation rapide. Cette adaptation lente pourrait refléter l'adaptation nécessaire pour coder des stimuli naturels.

Wen et al. sont allés un peu plus loin dans l'estimation de la constante de temps τ d'adaptation des neurones du nerf auditif. Dans un souci d'éliminer le biais du à des données peu nombreuses, ils ont utilisé une méthode différente pour estimer la constante de temps τ . Ils ont tout de même obtenu un τ du même ordre de grandeur que celui des neurones du colliculus inférieur, mais avec une adaptation moins forte dans le nerf auditif.

1.3 Hypothèse supplémentaires et Mécanismes responsables de l'adaptation au niveau sonore

Cette adaptation étant temporelle et dépendante d'un niveau sonore moyen, on parle d'*effet de contexte.* Cet effet suggère que si l'on présente un son ayant un niveau moyen et une certaine distribution dans une oreille, le système auditif devrait s'adapter à ce niveau et permettre ainsi une meilleur discrimination d'intensité dans une gamme proche de ce niveau. De plus, les études précédentes suggèrent que la première étape de cette adaptation se situe au niveau de la cochlée . Ces idées, la volonté de les observer, de localiser et comprendre le fonctionnement de cette adaptation, motivent la démarche présentée en deuxième partie.

2 Quelques conséquences à l'effet de contexte en perception auditive

Plusieurs effets de contexte sur notre perception de l'intensité sonore ont été montré dans des études précédentes. En voici quelques exemples dont nous cherchons à interpréter les résultats.

2.1 L'adaptation au niveau sonore moyen comme explication au Loudness enhancement

Wang et al. (2015) ont étudié le *loudness enhancement*. Ce phénomène correspond à l'augmentation de la sonie d'un signal lorsqu'il est précédé d'un signal précuseur d'intensité plus élevée. Les expériences ont été menés chez deux groupes de sujet : un groupe de sujets normo-entendants, et un groupe d'implantés cochléaires.

Les auteurs ont mis au point une tâche de comparaison d'intensité d'un signal cible avec un signal lui succédant. Le protocole consistait en la présentation de deux sons purs, précédés d'un précurseur bruité centré autour de la fréquence des deux sinus. Seul le signal cible (premier des deux sons purs) était sous l'influence du contexte car séparé de 50 ms, alors que le signal de comparaison (le deuxième son pur) était écarté de 1 seconde du signal cible. En faisant varier le niveau sonore du signal de comparaison et la fréquence du contexte, ils ont cherché à évaluer la capacité des sujets à percevoir une différence d'intensité entre le signal cible et le signal de comparaison. Le loudness enhancement était retrouvé en traçant les courbes représentant la proportion d'essais pour lesquels des sujets normo-entendants ont jugé le son de comparaison plus fort que la cible en fonction du niveau du son de comparaison. Nous observions alors un décalage vers les niveaux de signal de comparaison croissants de cette courbe lorsque le précurseur était présent par rapport à la position de cette courbe dans la condition sans précurseur. Autrement dit, il était plus difficile pour les sujets normo-entendants d'entendre que le signal de comparaison était plus fort lorsqu'il y avait la cible car le précurseur devant la

cible augmentait sa sonie. Cet effet est le plus intense lorsque le précurseur est à la même fréquence que la cible.

La même expérience a été menée avec des sujets implantés cochléaire. Il était alors intéressant de voir que cet effet n'apparaissait pas ou peu. L'implant cochléaire "court-circuite" la périphérie du système auditif pour venir exciter directement le nerf auditif. Ainsi, la moins bonne performance des sujets implantés (le Loudness enhancement ne semble pas s'activer) invite à penser qu'une première étape de ces phénomènes se déroule en amont du nerf auditif et est fortement accentuée à des niveaux plus centraux. Une autre conclusion de cette étude est qu'il existe une sélectivité fréquentielle de ce phénomène (le contexte ayant la fréquence centrale identique à la fréquence du signal cible présentait alors le meilleur résultat).

Nous pouvons penser que le système auditif s'adaptait au niveau sonore du précurseur au sens de Dean et al. (2005) et Wen et al. (2009) du fait de la nature du stimulus et que cela avait un effet sur la cible (la séparation entre précurseur et cible étant bien inférieur à la constante de temps τ mesurée par Dean et al. (2008)). Comme exposé précédemment, on peut diviser le phénomène d'adaptation en deux types : l'adaptation de la gamme dynamique, et une adaptation "classique" du taux de décharge. Hors, l'effet conjugué de ces deux adaptations ne semble pas être en adéquation avec les résultats de cette étude pour les normo-entendants. Par exemple, à niveau égal entre les deux signaux, le signal de comparaison n'était pas sous l'effet de l'adaptation classique du taux de décharge au niveau sonore du précurseur (le son de comparaison est présenté 1 seconde après la cible), son intensité perçue aurait donc dû être supérieure à celle de la cible (alors sous l'effet de l'adaptation) s'il existait une relation monotone entre taux de décharge et sonie.

Voici un schéma présentant cette inadéquation entre résultats observés (loudness enhancement) et l'adaptation de la gamme dynamique introduite par Dean et al. (2005). On observe la fonction d'E/S "adaptée" (courbe verte) au niveau sonore du précurseur, et la fonction d'E/S de référence (courbe bleue), alors non "adaptée" telle qu'elle serait au moment de la présentation du signal de comparaison si les constantes de temps d'activation de l'adaptation estimées par Dean et al. (2008) et Wen et al. (2012) sont correctes. Si la cible et le signal de comparaison était de niveau similaire (ligne rouge), on observe qu'étant donné la valeur du taux de décharge, le signal de comparaison aurait une sonie plus élevée que la cible à niveau égal.



FIGURE 2.3 – Expression du changement de différence dans le taux de décharges entre l'intensité du précurseur (rouge) et l'intensité du signal cible(jaune) avant et après adaptation

Bien que ce cas particulier semble clairement ne pas être en accord avec les résultats de Wang et al. (2015), nous pouvons également nous poser la même question pour d'autres niveaux sonores du signal de comparaison. Ainsi, il est possible qu'un autre effet soit responsable du loudness enhancement, malgré le fait que le stimulus imaginé par Wang et al. (2015) soit optimal pour présenter l'effet d'adaptation de la gamme dynamique.

2.2 La compression de l'intensité sonore effacée par l'adaptation du système auditif à un niveau sonore moyen

Une autre étude (Pienkowski and Hagerman, 2009) s'est intéressée au phénomène de compression dans le codage de l'intensité sonore dans la cochlée. Comme énoncé en introduction, il est possible d'observer une "bosse" dans la fonction de la fraction de Weber pour des sons purs relativement courts. De façon intéressante, Pienkowski et Hagerman ont également observé cette bosse en présentant des signaux longs (300 ms) lorsque le niveau d'un essai à l'autre variait sur une grande gamme dynamique. Cette bosse n'était cependant pas présente lorsque le niveau d'un essai à l'autre variait peu, comme c'est en général le cas dans les études de seuils de discrimination d'intensité.

Pour expliquer ce résultat, les auteurs se sont appuyés sur l'adaptation de la gamme dynamique introduite par Dean et al. (2005). En effet les résultats de Dean et al., pourraient permettre de comprendre la "bosse" observée pour des stimuli de niveaux constants. Si les signaux présentent une intensité qui varie peu d'un essai à l'autre, il est possible que le système s'adapte au contexte et améliore les capacités de discrimination, provoquant une disparition de la "bosse". Dans le cas de stimuli courts cependant, il est possible que cette adaptation n'ait pas le temps de se mettre en place et que la "bosse" reste observable. De façon similaire, si le niveau d'un essai à l'autre varie grandement, l'adaptation ne se met pas en place et la "bosse" est également observable.

2.3 Apprentissage perceptuel du système auditif pour le codage de l'intensité

Lors d'un test perceptif, un paramètre appelé effet attentionnel¹ est à prendre en compte. Lorsqu'on parle d'une adaptation à un stimulus dont le niveau sonore suit une distribution comme celle de Dean et al. (2005), il est naturel de se demander si cette adaptation a les mêmes conséquences sur des sons dit "communs" (contenus dans la HPR de la distribution) et sur des sons plus rares (Simpson et al., 2014). Ainsi, reprenant le paradigme probabiliste de Dean et al. (2005), Simpson et al. (2014) ont présenté à des sujets normo-entendants des séries de deux sons espacés de 350 ms, dans le cadre d'une tâche de discrimination d'intensité. L'intensité de ces deux sons pouvait se situer dans 3 zones : la HPR ou les deux autres LPRs (Low-Probability Region). Pour différentes sessions, ils ont fait varier la position de la HPR à la place d'une des deux LPRs.

Simpson et al. ont observé que le nombre de réponses correctes pour des cibles contenus dans la HPR dans le cadre de la tâche de discrimination d'intensité était stable, quelque soit la HPR, preuve d'un certain effet de contexte. Dans le même temps, ils ont relevé que pour des stimuli plus rares, soit des cibles provenant des LPRs de niveau sonore plus éloignés de la HPR, la proportion de réponses correctes s'améliorait au fil du test jusqu'à dépasser les performances du sujet pour les cibles contenues dans la HPR. Alors que pour les signaux contenus dans les LPRs prochent de la HPR, la proportion de réponses correctes diminuait.

Il est important de noter que ces résultats ne semblent pas en adéquation avec les observations électrophysiologiques de Dean et al. et Wen et al.. En effet la capacité de discrimination est améliorée jusqu'a devenir meilleure pour des signaux de niveau sonore éloigné de la HPR alors que les signaux les plus proches de la HPR (mais en dehors) présentent des résultats médiocres de discrimination. Cependant il faut relever que les intervalles de temps entre les essais étaient de 350 ms, ce qui est plus long que $2^*\tau$. Un des buts de notre travail sera de mettre en place une expérience psychophysique permettant de se placer dans des conditions plus proches des études electrophysiologiques.

Les résultats de Simpson et al. (2014) suggèrent un autre effet de contexte à long terme invitant le sujet à un apprentissage perceptuel, au fil des essais. Ainsi l'auteur évoque l'adaptation présentée par Dean et al. (2005) et Wen et al. (2009), comme origine de cet apprentissage. Mais il est difficile vis-à-vis de la dynamique de la fonction E/S étudiée de comprendre cette amélioration et de l'expliquer uniquement grâce à l'adaptation de la gamme dynamique, notamment à cause des résultats médiocres de la zone d'intensité la plus proche de la HPR et de l'échelle de temps (évolution des performances au fil de plusieurs dizaines d'essais).

^{1.} la perception est biaisée par la concentration, les attentes ou l'anticipation du sujet.

3 Démarche et Organisation

3.1 Déroulement du projet

L'objectif de notre étude d'ordre psychoacoustique se concentrait sur la perception des changements de niveau sonore chez les sujets normo-entendants. En prenant en compte les recherches et résultats physiologiques obtenus dans la littérature, nous avons tenté à travers des tests perceptifs, de mettre en évidence l'effet de contexte et cette adaptation de la gamme dynamique à un niveau sonore. Plus exactement nous nous sommes intéressés à la capacité des sujets à détecter une modulation d'amplitude imposée sur un signal. Deux expériences ont ainsi été conçues.

Mon travail de stage a couvert les différentes étapes nécessaires à la réalisation d'un test psychoacoustique, à savoir :

- La conception de la tâche, l'optimisation de la réduction du biais de mesure et la construction du stimulus.
- La programmation du protocole de mesure sur MATLAB.
- Le test pilote pour *debugger* et optimiser l'obtention des résultats.
- Les mesures avec des sujets normo-entendants.
- La mise en forme des résultats.
- L'analyse et l'interprétation des résultats directement et/ou par des méthodes statistiques.

La deuxième expérience a été pensée à l'issue de la première au vu des résultats obtenus. Sa justification est présentée au terme de l'analyse des résultats de l'expérience n°1.

Pour chacune de ces expériences, nous exposons les hypothèses, décrivons les méthodes employées, puis nous présentons et analysons les résultats obtenus.

3.2 Principe de la mesure

Un protocole de mesures perceptives est généralement composé d'une phase d'entraînement à la tâche qui permet d'optimiser la tâche principale aux performances de chacun des sujets. L'entraînement est suivi de la tâche principale (ici une tâche de détection de modulation). Chacun des protocoles développés sont décrits dans les parties 3.1 et 4.1.

Pour chacun des sujets, **une audiométrie tonale** est réalisée en amont de l'expérience. Ainsi, seuls les sujets dits "normo-entendants, c'est à dire présentant des seuils de détection absolus inférieurs à 20 dB HL (Hearing Level) pour des fréquences allant de 125 Hz à 8000 Hz, ont participé aux expériences.

3.3 Matériel et conditions de mesures

Dans le but de passer l'expérience nous avons eu recours à plusieurs outils présentés ci-dessous :

- L'ensemble de la programmation (stimuli & interface graphique) a été faite sur Matlab 2012a.
- La carte son utilisée pour transmettre les sons au casque est une FIREFACE UCX de RME.
- Le casque utilisé est un SENNHEISER HDA 200. La méthode d'étalonnage de ce casque est présentée en Annexe.
- Les sujets ont passé les tests dans une cabine Audiométrique à double paroi du LMA.

Chapitre 3

Expérience n^o1 : Effet d'un son précurseur sur les seuils de détection de modulation

1 Définition & Méthodes

Suite aux résultats présentés dans la partie précédente, nous avons émis l'hypothèse qu'une modulation d'amplitude imposée sur un signal précédé d'un son précurseur de même niveau, devrait être plus facilement détectable par un auditeur que lorsque le précurseur a un niveau différent. Nous avons construit le protocole suivant en conséquence. L'objectif était d'observer les différences de performance du sujet dans une procédure adaptative de détection de modulation(la profondeur de la modulation varie en fonction des réponses du sujet jusqu'à atteindre le seuil de détection). La modulation d'amplitude était à détecter sur un unique son pur précédé de différents sons pouvant potentiellement influer sur les performances du sujet. Le sujet devait préciser si "oui ou non" il entend cette modulation. Nous avons choisis d'utiliser une tâche de type "oui/non" à un seul intervalle plutôt qu'une tâche classique de discrimination d'intensité à 2 intervalles de façon à respecter la constante de temps relativement courte observée dans les études physiologiques (Dean et al., 2005).

2 Nature du Stimulus

Le stimulus est composé de trois parties, un son dit précurseur, un silence et une cible.



FIGURE 3.1 – Configuration d'un stimulus

La cible est un son pur de 2000 Hz d'une durée de 300 ms. Pour chaque stimulus, une loi de Bernoulli de paramètre p = 1/2 décide de l'apparition d'une modulation sur la cible. Le sinus est fenêtré aux extrémités par deux demi-fenêtres de Hanning de 10 ms. Le sinus a un niveau sonore de 45 dB SPL. Un roving ¹ de 2 dB

^{1.} roving : Le niveau sonore est aléatoirement varié autour de sa valeur initiale, suivant un intervalle donné. Dans notre cas \pm 2 dB

est appliqué sur la cible.

Le précurseur est un bruit à bande étroite centré sur la fréquence du signal cible. La largeur de bande du précurseur correspond à 1 ERB², soit dans notre cas une bande de 250 Hz centrée géométriquement autour de la fréquence centrale de 2000 Hz. Le précurseur est généré par addition de sons purs espacés de 1 Hz sur l'intervalle de l'ERB ayant tous la même amplitude et une phase aléatoire. Le niveau sonore du précurseur peut prendre deux valeurs, 45 dB SPL ou 75 dB SPL. Sa durée est de 2 secondes.

Le silence est positionné entre le précurseur et la cible. Il est tantôt long (2 secondes) tantôt court (150 ms). Ces deux durées représentent deux conditions distinctes à mettre en comparaison avec la constante de temps mesurée par Dean et al. (2005) (c.f. §I.1.2). La première de 100 ms correspond à la condition où la cible devrait être influencée par le précurseur (la constante de temps de l'adaptation de la gamme dynamique est évaluée à 160 ms). Si nous avons introduit un silence de 100 ms plutôt que d'enchaîner directement précurseur et cible, c'est pour nous émanciper d'éventuels effets de masquage pouvant affecter l'audibilité de la cible. La deuxième condition de durée du silence (1 seconde) avait pour but de se placer au delà de la constante de temps afin que la cible ne subisse pas ou peu d'effet de contexte dû au précurseur.

Le sujet devait donc détecter une modulation d'amplitude de 10 Hz imposée sur le signal cible. Tous les sons étaient uniquement présentés sur l'oreille gauche. Une barre de chargement montrait la progression temporelle du précurseur au sujet et indiquait l'apparition de la cible (correspondant alors à la fin de la barre de chargement).

Nous souhaitions initialement comparer les effets observés pour une cible à 45 dB SPL et à 75 dB SPL. Cependant, nous n'avons pas trouvé d'effet de contexte dans nos résultats pour une cible à 45 dB SPL, nous avons donc préféré nous orienter vers un nouveau protocole (c.f. Chapitre 3) et ne pas réaliser la mesure pour une cible à 75 dB SPL; D'autant plus que les mesures pilotes à 75 dB SPL n'indiquaient aucune tendance.

La tâche étant une procédure adaptative, la modulation appliquée sur la cible était dans un premier temps évidente, par la suite la profondeur de modulation diminuait. A chaque essai, la profondeur de modulation variait avec le type de réponse (correcte ou incorrecte), jusqu'à atteindre le seuil. Nous voulions donc étudier la profondeur de modulation minimale détectée par le sujet pour différentes conditions. Pour résumer, cette expérience comprenait 4 conditions :

- 2 silences : 100 ms et 1 s

- 2 niveaux de précurseurs : 45 et 75 dB SPL.

3 Présentation de la méthode

Dans cette expérience nous avons utilisé une procédure adaptative pour observer l'influence du précurseur sur notre perception de la cible (le son pur modulé). Nous présentons ci-dessous le concept de la procédure adaptative dans un premier temps, puis nous décrivons une modification de cette méthode adaptée à notre expérience.

3.1 Définition : Procédure Adaptative

Une procédure adaptative permet d'obtenir une mesure du seuil de perception d'un sujet sur une tâche donnée. Cette procédure consiste généralement en la présentation d'un stimulus cible et d'un stimulus de référence. Le stimulus cible diffère du stimulus de référence suivant une dimension particulière et la tâche du sujet est de détecter cette cible, de la différencier du stimulus de référence. Si la réponse du sujet est correcte, alors la difficulté de la tâche est augmentée en réduisant la différence entre stimulus cible et de référence. Réciproquement, si le sujet donne une réponse incorrecte, la différence entre stimulus cible et de référence est accentuée, réduisant ainsi la difficulté de la tâche. Cette méthode permet donc de converger vers une certaine valeur du seuil de perception.

^{2.} Equivalent Rectangular Bandwidth : La largeur de bande rectangulaire équivalente est une mesure utilisée en psychoacoustique qui donne une approximation de la largeur de bandes des filtres pour l'audition humaine. Elle utilise une simplification non physique pour modéliser le filtre comme un filtre passe-bande rectangulaire.

En psychoacoustique, un exemple de procédure classique est la procédure adaptative à 2 intervalles (twointerval forced choice, 2IFC). Pour prendre l'exemple d'une tâche de détection de modulation, le sujet entend à chaque essai un son de référence non modulé et un son cible modulé en amplitude, l'ordre de présentation étant aléatoire. Le sujet doit indiquer si la cible était présentée dans le premier ou dans le second intervalle.

Il existe différentes plusieurs définitions du "seuils" de perception. Différents procédures estiment le seuil mesuré comme un point particulier de la fonction psychométrique³. Voici quelques exemples présentés par Levitt (1971) pour une tâche de 2IFC:

- One-Down One-Up : Une bonne réponse augmente la difficulté, une mauvaise réponse baisse la difficulté. Position sur la fonction psychométrique : 50%.
- Two-Down One-Up : Deux bonnes réponses augmentent la difficulté, une mauvaise réponse baisse la difficulté. Position sur la fonction psychométrique : 70.7%
- Three-Down One-Up : Trois bonnes réponses augmentent la difficulté, une mauvaise réponse baisse la difficulté. Position sur la fonction psychométrique : 75%

Par exemple, on définit le seuil obtenu par une procédure *one-down one-up* comme le niveau de cible pour lequel un sujet va répondre correctement une fois sur deux. Le pas de variation entre chaque essai s'affine petit à petit. Par exemple dans notre cas, la profondeur de modulation était maximale au départ. Ensuite entre chaque essai, le pas était de 2 dB, puis au bout de 2 renversements (un renversement équivaut à un changement de tendance entre augmentation et diminution de la profondeur de modulation) il passait à 1 dB. Enfin le seuil à mesurer est calculé comme la moyenne des valeurs prises entre un certain nombre de renversements.

La Figure 3.2 présente un exemple de "tracking" pour une procédure adaptative *three down-one up* dans le cadre d'une tâche de détection de modulation d'amplitude avec un choix forcé sur deux sons purs de 2000 Hz. Le premier graphe représente chaque étape de la procédure, le second est un résumé des fluctuations avec les renversements utiles (*) au calcul du seuil.



FIGURE 3.2 - Tracking de seuil d'une procédure adaptative, dans le cadre d'une tâche de détection de modulation sur 2 intervalles.

L'avantage d'une procédure adaptative à plusieurs intervalles est qu'elle n'est pas biaisée. Un inconvénient est qu'elle implique la présentation d'au moins deux stimuli, ce qui rend chaque essai plus long qu'une tâche ne contenant qu'un seul intervalle. Cet inconvénient est rédhibitoire dans notre cas car nous cherchons à mettre en évidence un phénomène ayant une constante de temps courte. Nous avons donc cherché dans la littérature une procédure à 1 intervalle (de type "oui/non") qui ne serait pas biaisée. Cette procédure est décrite dans la

^{3.} La relation entre la probabilité de détection (0-100%) et une grandeur physique du stimulus

partie suivante.

3.2 Procédure : Single Interval Adjustment-Matrix

Pour ce test, le sujet n'avait le choix entre deux signaux comme dans l'exemple précédent, un seul signal lui était présenté. Pour chaque essai, le sujet devait donc préciser si "Oui" ou "Non" il avait entendu une modulation sur la cible. Le seuil de détection (correspondant à une profondeur de modulation) était mesuré en moyennant les 8 derniers renversements sur un total de 14. Ainsi la profondeur de modulation commençait par varier avec un pas de 2 dB dans un premier temps, puis de 1 dB après 4 renversements.

Kaernbach (1990) a proposé une méthode adaptative basée sur un unique intervalle. Cette méthode a été démontrée non biaisée et présentant des résultats similaires à ceux obtenus avec une tâche 2*IFC*, tout en réduisant le temps d'exécution du fait qu'il n'y a qu'un seul intervalle. De la même façon que Kaernbach (1990), l'amplitude de la mise à jour de la profondeur de modulation dépendait du type de réponse, permettant ainsi d'obtenir une mesure non biaisée du seuil sur une tâche ne contenant qu'un seul intervalle. Il existe 4 types de réponse possible :

- hit : modulation présente, modulation détecté
- miss : modulation présente, modulation non détectée
- correct rejection : modulation absente, modulation non détectée
- false alarm : modulation absente, modulation détectée

Pour chacune de ces réponses, la modulation ne variait pas de la même façon. Nous avons appliqué les coefficients présentés dans la Table 3.1. Cette table montre que pour une configuration présentant aléatoirement (Bernoulli, p = 1/2) la *cible modulée* ou la *cible non-modulée*, le changement de profondeur de modulation était différent. Par exemple, si le pas était de 2 dB et que le sujet répondait correctement alors que la cible était modulée (hit), la profondeur de modulation diminuait de 2 dB à l'essai suivant; si le pas était de 1 dB et que le sujet pensait avoir entendu une modulation alors que la cible n'était pas modulée (false alarm), la profondeur de modulation augmentait de 2 dB. Cette méthode faisait converger au point de 50% de réponses correctes de la fonction psychométrique.

	Yes	No
Signal cible (modulé) (50 %)	-1 (hit)	1 (miss)
Signal de référence (non-modulé) (50 %)	2 (false alarm)	0 (correct rejection)



3.3 Organisation du protocole

La procédure se séparait en deux parties. Dans un premier temps, un entraînement préparait les sujets à la tâche principale. Par la suite la procédure adaptative était proposée pour différentes conditions.

3.3.1 Phase d'entraînement

Lors de l'entraînement, le sujet devait réaliser la mesure adaptative présentée ci-dessus sans précurseur à 4 reprises, dans le but de servir de témoin et d'habituer le sujet à l'exercice. Le reste de l'entraînement préparait le sujet directement à la tâche, en lui proposant les mêmes conditions que celles présentées dans le tableau 3.2 à 2 reprises.

3.3.2 Tâche Principale

Voici l'ensemble des conditions que devait traiter le sujet via la procédure adaptative (Tab. 3.2). Une représentation graphique de ces conditions est exposée en annexe.

Type	Nature du précurseur	Nature du gap
0	(2 secondes de silence)	/
1	même niveau sonore que la cible	silence court
2	même niveau sonore que la cible	silence long
3	niveau sonore différent de la cible	silence court
4	niveau sonore différent de la cible	silence long

TABLE 3.2 – Ensemble des conditions pour la procédure adaptative

Chaque procédure adaptative durait environ 5-6 minutes. Nous avons mesuré 8 seuils par personne et par condition. La durée de la tâche était donc de 8x5x5 minutes (~ 4 heures). L'ensemble de l'expérience durait 6 heures en incluant l'entraînement (quatre entraînements dans le silence, puis deux entrainements à la tâche), réparties en 3 sessions : 2 heures d'entraînement puis 2 fois 2 heures de mesure sur la tâche.

4 Analyse des résultats de l'expérience n°1

Les mesures ont été effectuées sur 8 sujets normo-entendants âgés de 18 et 47 ans dont 4 hommes et 4 femmes.

4.1 Hypothèses

Ici nous avons testé les capacités de sujets normo-entendants à percevoir une modulation d'amplitude imposée sur un son pur. Nous cherchons à observer l'influence du type de précurseur sur la détection de cette modulation. En s'appuyant sur les résultats de Dean et al. (2005), nous émettons l'hypothèse que si le silence a une durée inférieure à la constante de temps du phénomène d'adaptation de dynamique (cf. 2.1.2), le précurseur devrait avoir une influence sur la détection de modulation. Ainsi, si le précurseur a le même niveau sonore que le signal cible et que le silence est plus court que la constante de temps (type 1), alors le sujet devrait obtenir les meilleures performances. Réciproquement, ses performances devraient être détériorées par rapport à la condition silence (type 0) et à la condition optimale (type 1) si le précurseur à un niveau sonore différent de la cible (type 3). Enfin, si le silence est bien plus grand que la constante de temps (type 2, type 4), les performances ne devraient pas ou peu être affectées par le précurseur. En termes statistiques, nous nous attendons donc à obtenir un effet d'interaction entre le facteur "niveau de précurseur" et le facteur "durée du silence".

4.2 Mise en forme des résultats

Aucun effet d'entraînement n'a été observé au cours de l'expérience. Les performances des sujets variaient sans suivre une tendance particulière (pas d'amélioration ni de détérioration). Pour chacun des types de précurseurs de 0 à 4 (0 étant la condition sans précurseur) et pour chaque personne, nous calculons **la moyenne** et **l'écart type** des seuils mesurés sur 8 observations. Nous obtenons ainsi un aperçu de l'influence du précurseur en fonction de sa nature. Les seuils mesurés correspondent à la profondeur de modulation exprimée en dB, donnée par le rapport entre l'amplitude de la modulation sur l'amplitude de la porteuse.

$$A_{Threshold} = 20 \log_{10} \frac{I_{mod}}{I_{sig}} \tag{3.1}$$

4.3 Analyse des résultats bruts et ANOVA

Afin de pouvoir estimer dans leur globalité nos résultats, nous avons normalisé les seuils de chacun des participants par leur seuil mesuré dans la condition silence (type 0), puis les avons moyennés. Voici donc les seuils globaux, moyennés pour l'ensemble des sujets, ainsi que leurs écarts types présentés dans la Figure 3.3.

Les seuils moyens obtenus pour les précurseurs de type 1 à 4 sont très semblables et il ne semble pas y avoir d'effet cohérent de l'intéraction entre la durée du silence et le niveau du précurseur. Les écarts types étant grands par rapports aux différences entre les seuils.

Nous avons effectué une analyse de la variance à mesures répétées à deux facteurs incluant la durée du silence et le niveau du précurseur. Cette analyse de la variance est dite à mesures répétées car nous avons réalisé l'expérience sur plusieurs sujets et que nous nous intéressons aux variations entre les différentes conditions pour chaque sujet. Elle nous permet alors de faire un Test de Fisher et de mesurer **l'indice de significativité** p, dont la valeur doit être inférieure à 0.05 pour accepter le risque que l'hypothèse nulle soit vraie (H_0 : pas d'effet du facteur observé sur les données).

Nous faisons une ANOVA à mesures répétées sur 2 paramètres séparément (la longueur du silence et le niveau sonore du précurseur), et sur leur effet combiné. Les résultats sont présentés dans le Tableau 3.3.

Ainsi la valeur de p pour chacun des paramètres et leur combinaison est de plus de **0.85**. L'hypothèse nulle ne peut être rejetée, il n'est donc pas utile de pousser plus loin l'analyse sur ces données. Nous pouvons



FIGURE 3.3 – Moyennes et écart types calculés sur les seuils des 8 sujets pour les 4 conditions (1-4)

Paramètre étudié	DL	DL de l'erreur	F	p
Niveau du précurseur	1	7	0.036	0.86
Durée du silence	1	7	0.014	0.91
Niveau du précurseur x Durée du silence	1	7	0.011	0.92

TABLE 3.3 – Tableau de résultats de l'ANOVA faite sur les résultats globaux de l'expérience 1 avec DL : degré de liberté et p l'indice de significativité.

cependant relever qu'au niveau individuel, chaque sujet semble montrer des différences entre les conditions. Nous avons donc réalisé des analyses individuelles pour chaque sujet. Ces analyses étaient aussi des ANOVA à mesures répétées réalisées sur les huit répétitions de la procédure avec les mêmes facteurs que pour l'analyse globale.

La Figure 3.4 présente l'ensemble des seuils moyennés ainsi que leurs écarts types sur 8 observations pour les 8 sujets de l'étude.





FIGURE 3.4 – Moyennes et écart types (sur 8 observations) des mesures de seuil de détection de modulation pour chacune des conditions, pour 8 sujets normo-entendants.

Nous avons observé quelques différences significatives entre les conditions pour certains sujets (3,5,8...) venant le plus souvent d'un effet de la durée du silence. Cependant, nous n'avons pas trouvé de différence significative d'interaction entre le niveau du précurseur et la durée du silence. Etant donné la diversité de nos résultats, nous n'avons pu conclure sur un effet en particulier.

4.4 Conclusions de l'expérience

Les résultats de cette expérience ne vont pas dans le sens d'un effet de l'adaptation du système auditif à un contexte sonore puisqu'aucune différence n'a été observée entre les conditions. Plusieurs raisons peuvent être à l'origine de notre incapacité à conclure : Il est possible que les précurseurs perturbaient la détection de la modulation car il n'étaient pas pertinents pour faire la tâche. Parallèlement, une sensation de gêne pour les sujets provoquée par le précurseur était parfois évoquée de manière spontanée, alors que celui-ci, selon nos hypothèses devait, au moins pour la première condition, aider à la détection. La durée du silence court (100 ms) était peut être trop longue. S'il est certain que sa valeur est inférieure au τ estimé par Dean et al. (2005) (160 ms), il est possible qu'une grande partie de l'effet se soit estompée à la fin du silence.

Au vu de ces observations, nous avons été amenés à repenser un protocole de test en accord avec les expériences de Dean et al. (2005) et Wen et al. (2009). Ainsi nous nous sommes inspirés de leurs stimuli pour concevoir les nôtres. Nous avons cherché à obtenir un stimulus moins séquentiel (le précurseur puis la cible) en positionnant la cible de manière aléatoire au sein d'un contexte.

Chapitre 4

Expérience n^o2 : Influence du contexte sonore sur la détection de modulation

1 Définition & Méthodes

L'objectif de cette procédure était d'obtenir une mesure des performances des sujets dans une tâche de détection de modulation d'amplitude dans trois contextes sonores différents. Ces trois contextes correspondent à trois niveaux sonores moyens. Nous souhaitions observer si, comme l'ont suggéré les travaux de Dean et Wen, un contexte favorable (par exemple : un contexte de niveau moyen 45 dB SPL et une modulation à détecter sur un signal à 45 dB SPL au sein de ce stimulus) offrait au sujet la capacité de mieux détecter une modulation d'amplitude. Inversement nous voulions observer si une cible présentée dans un contexte de niveau différent était moins facile à détecter (par exemple une cible à 75 dB SPL au sein d'un contexte de niveau moyen à 45 dB SPL).

1.1 Nature du Stimulus

Le stimulus, d'une durée d'environ 7 secondes était constitué de plusieurs intervalles de 200 ms. Chaque intervalle était un son pur de 2000 Hz, fenêtré à ses extrémités extrémités par des demi-fenêtres de Hanning de 20 ms¹. Le choix du niveau sonore pour chaque intervalle suivait l'une des 3 distributions présentées dans la Figure 4.1. Chaque distribution contenait une zone de probabilité à 80% et une zone à 20% s'approchant ainsi de la distribution du stimulus de Dean et al. (2005). La distribution était générée une unique fois de façon parcimonieuse sous forme d'une liste de niveaux sonores respectant cette probabilité et permettant d'avoir le stimulus le moins long possible, puis cette liste voyait son ordre rendu aléatoire pour chaque présentation du stimulus. Le pas entre chaque niveau était de 5 dB SPL. Un roving de 2 dB était de plus imposé sur chaque intervalle de 200 ms. Il est important de noter qu'il eut été préférable d'utiliser des intervalles plus courts de façon à se rapprocher des stimuli utilisés par Dean et al. (2005) (50 ms). Cependant, cela aurait rendu la tâche très difficile et aurait également imposé d'utiliser des fréquences de modulation très rapides.

^{1.} la durée de ces demi-fenêtres a été choisie dans le but de minimiser les effets d'étalement spectral pouvant gêner la détection de la modulation d'amplitude



FIGURE 4.1 – Les 3 distributions d'un stimulus

Le sujet était amené à détecter une modulation de 50 Hz placée sur un unique intervalle de 200 ms du stimulus. Cette fréquence de modulation était choisie dans le but de minimiser le masquage proactif des modulations d'amplitude dû au changement de niveau sonore toutes les 200 ms sur la modulation à détecter (Wojtczak and Viemeister (2005)). La variation de niveau toutes les 200 ms induit, en effet, une modulation d'amplitude à 5 Hz chez le sujet. Si la fréquence de cette modulation apparente avait été trop proche de la modulation à détecter, il est possible que cette dernière eut été dissimulée.

Le choix de l'intervalle (ou cible) modulé était aléatoire dans le stimulus. Le niveau sonore de l'intervalle modulé était toujours compris dans l'ensemble suivant : $\{45, 60, 75\}$ dB SPL. Dans le but de ne pas surprendre le sujet, les 4 premiers intervalles d'un stimulus donné n'étaient pas modulés. Par une simple pression d'une touche du clavier le sujet indiquait la détection d'une modulation. Le sujet devait répondre dans un intervalle de 600 ms suivant le début de l'intervalle modulé pour que sa réponse soit jugée correcte. Cette durée de 600 ms a été estimée expérimentalement puis validée de la même façon lors des mesures. Un *Feedback* correct/incorrect lui était présenté après chaque réponse. Pour chaque stimulus de 7 secondes, les sujets ne pouvaient donner qu'une seule réponse. Voici l'ensemble des configurations présentées au sujet :

Distribution A	Distribution B	Distribution C
Cible 45 dB SPL	Cible 45 dB SPL	Cible 45 dB SPL
Cible 60 dB SPL	Cible 60 dB SPL	Cible 60 dB SPL
Cible 75 dB SPL	Cible 75 dB SPL	Cible 75 dB SPL

TABLE 4.1 – Différentes configurations de l'expérience

La figure 4.2 montre 3 exemples de stimuli pour la tâche correspondant à chacune des distributions de la Fig.1.

1.2 Organisation du protocole

La procédure se séparait en deux parties : une phase préliminaire et la tâche principale. La phase préliminaire permettait de déterminer les seuils de détection de modulation des sujets pour des sons purs ayant 3 niveaux sonores différents (45, 60 et 75 dB SPL). Dans la tâche principale, nous avons mesuré les fonctions psychométriques de détection de modulation pour plusieurs niveaux de cible et plusieurs contextes. Les seuils



FIGURE 4.2 – 3 exemples de stimulus suivant les 3 Distribution présentées dans la Figure 4.1. Distribution A : avec une HPR de 45 dB SPL et une cible à 75 dB SPL à t = 2.6 s. Distribution B : stimulus avec une HPR de 60 dB SPL et une cible de 60 dB SPL à t = 5.4 s. Distribution C : stimulus avec une HPR de 75 dB SPL et une cible à 60 dB SPL à t = 2.8 s.

obtenus dans la phase préliminaire nous ont permis d'optimiser la mesure de ces fonctions psychométriques individuellement pour chaque sujet car ceux-ci présentaient des différences de performance.

1.2.1 Phase Préliminaire

Le seuil de détection pour chaque niveau était obtenu via une procédure adaptative one-down one-up. Contrairement à la tâche adaptative décrite dans le protocole précédent, la taille du pas de variation de la profondeur de modulation ne dépendait pas de la réponse du sujet. Le seuil était estimé après 12 renversements (permettant pour l'ensemble des sujets de converger vers une valeur limite de profondeur de modulation) avec un pas minimum de 1 dB. Le seuil de détection correspondait à la moyenne calculée sur les 6 derniers renversements. Pour un observateur "parfait" ne provoquant aucune false alarm, cette procédure converge au point correspondant à 50 % de la fonction psychométrique². Le stimulus, comme pour la tâche principale, était composé de plusieurs intervalles dont un était modulé. Selon le niveau sonore pour lequel le seuil était mesuré, tous les intervalles avaient un niveau sonore identique (ex : si l'on mesurait une modulation pour un niveau de 60 dB SPL, tous les intervalles du stimulus étaient à 60 dB SPL). Cependant, comme pour la tâche principale, un roving additionnel de 2 dB était appliqué pour chaque intervalle. Chaque procédure adaptative avait une durée d'environ 4-5 minutes et était répétée 4 fois. Les seuils obtenus étaient ensuite moyennés.

1.2.2 Tâche principale

Dans le but d'obtenir une fonction psychométrique basée sur la profondeur de modulation pour chaque configuration, nous avons utilisé les valeurs de seuils obtenues précédemment pour nous placer dans la zone de plus grand coefficient directeur de la fonction psychométrique (autour de 50 % de réponses correctes). Ainsi nous avons choisi un intervalle de profondeur de modulation compris dans $[(Depth_{threshold}-2)(Depth_{threshold}+10)]$ $Depth_{threshold}$ étant la moyenne des seuils mesurés par sujet pour une condition lors de l'entrainement. Nous avons choisi cet intervalle de manière empirique et en nous basant sur le fait que la phase préliminaire présentait

^{2.} proportion de réponses correctes dans le cadre d'un test psychophysique selon le paramètre observé

des conditions idéales de détection puisque le niveau du contexte était identique au niveau de cible. Avec un échantillonnage de 1.5 dB SPL, nous avons mesuré la fonction psychométrique de chaque configuration (Table 4.1) avec un échantillonnage de 8 profondeurs de modulations. L'intervalle des profondeurs de modulation était raffiné en fonction de la proportion de réponses correctes ou incorrectes du sujet lors des premiers blocs de mesure. Nous avons ainsi obtenu des proportions de modulations détectées dans 72 conditions différentes. Ces 72 essais ont été itérés 30 fois chacun dans le but d'avoir suffisamment de données pour approximer les fonctions psychométriques. Nous pourrons ainsi en étudier 9 différentes et les comparer.

Pour la première session après la phase préliminaire, une mesure des seuils de détection était réalisée avant de commencer la tâche dans le but de vérifier l'exactitude des seuils mesurés lors de l'entrainement. De ce fait, nous pouvions ajuster l'intervalle en cas de besoin.

Un bloc de la tâche correspondait à une seule distribution du contexte(voir Fig. 4.1). Nous présentions l'ensemble des cibles (toutes les profondeurs de modulation pour les 3 cibles différentes), soit 24 essais par distributions présentés de façon aléatoire pour chaque bloc. Dans le but de ne pas perturber les sujets, 5 blocs de la même distribution étaient réalisés consécutivement avant de passer à la distribution suivante (soit 5x24xDistrib.A - 5x24xDistrib.B - 5x24xDistrib.C - 5x24xDistrib.A ...). La durée d'un bloc était d'environ 3 minutes.

La durée totale du protocole était d'environ 6h (1h d'entrainement et 4h30-5h de tâche).

2 Analyse des résultats de l'expérience n°2

2.1 Présentation des résultats

Les mesures ont été effectuées sur 5 sujets normo-entendants âgés de 19 et 47 ans dont 3 hommes et 2 femmes. Aucun effet d'entrainement n'a été observé durant l'expérience.

Après avoir étudié les seuils mesurés lors de la phase préliminaire, nous avons calculé le pourcentage de réponses correctes pour chacune des profondeurs de modulation employées lors de la tâche principale dans chacune des configurations. Puis, nous avons approximé nos données (30 observations sur 8 profondeurs de modulations) grâce à un modèle *logit* de régression : une sigmoïde. Cette sigmoïde est la forme réciproque d'un fonction logistique sur une base décimale, soit la formule du modèle :

$$S = \frac{1}{1 + 10^{(pos_{50} - x).slope}}$$

Avec dans notre cas x : l'axe des profondeurs de modulation. Les paramètres pos_{50} (position à 50%) et slope (valeur de la pente au point pos_{50}) sont tous deux estimés par la fonction MATLAB nlinfit.

Grâce à ces sigmoïdes, nous obtenons les fonctions psychométriques³ pour les conditions explicitées en Tab. 4.1 pour chaque sujet. Il nous est alors possible de comparer ces fonctions de différentes façons pour chaque personne grâce au relevé de la profondeur de modulation correspondant au point d'inflexion $T_{50}(L_{cible})$ de chaque fonction psychométrique (le niveau de modulation correspondant à 50% de réponses correctes). Nous avons ensuite réalisé une ANOVA à mesures répétées sur ces $T_{50}(L_{cible})$ pour chaque sujet suivant deux facteurs : le niveau de la HPR et le niveau de la cible.

La fausse alarme anticipée : Il n'était pas rare lors des mesures qu'au sein d'un essai, un sujet signale avoir entendu un son modulé alors que ce dernier n'avait pas encore été présenté. Le sujet n'ayant qu'une seule opportunité pour répondre, il est possible qu'il rate une modulation présentée après qu'il ait répondu alors qu'il aurait été en réalité capable de la détecter. Afin d'éviter ce bruit de mesure additionnel dû à ces *fausses alarmes*, nous avons décidé de ne pas comptabiliser les essais pour lesquels le sujet avait répondu avant que la modulation ne lui soit présentée. Cela signifie que, pour chaque sujets, 5 à 10% des données n'ont pas été prises en compte.

2.2 Hypothèses

En suivant les résultats de la littérature présentés dans l'état de l'art, nous émettons l'hypothèse que les fonctions psychométriques et, plus particulièrement le T_{50} , pour une cible donnée devrait dépendre de la HPR. De façon similaire à l'expérience 1, nous nous attendons à observer un effet d'interaction entre le niveau de la cible et le niveau de la HPR. Voici quelques exemples de résultats attendus :

- Une meilleure discrimination de la cible à 45 dB SPL dans la HPR à 45 dB SPL que dans la HPR à 75 dB SPL. Soit, un $T_{50}(75dB)$ plus petit dans la HPR à 75 dB SPL (Distribution C) que dans la HPR à 45 db SPL (Distribution A). Et réciproquement pour $T_{50}(45dB)$
- Une meilleure discrimination de la cible à 75 dB SPL dans la HPR à 75 dB SPL que dans la HPR à 45 dB SPL. Soit, un $T_{50}(45dB)$ plus petit dans la HPR à 45 dB SPL (Distribution A) que dans la HPR à 75 db SPL (Distribution C).
- Un $T_{50}(60dB)$ plus petit dans la HPR à 60 dB SPL (Distribution B) que $T_{50}(45dB)$ et $T_{50}(75dB)$.

La figure 4.3 montre schématiquement l'allure des résultats que nous attendions si l'adaptation à la gamme dynamique influait sur la détection de modulation. Sur cette figure, on peut voir la tendance que prendrait chaque cible en fonction de la HPR pour être en accord avec nos hypothèses.

^{3.} Une fonction psychométrique doit théoriquement représenter toutes les proportions de réponses correctes de 0 à 100, pour des observateurs supposés non biaisés



FIGURE 4.3 – Schéma des positions hypothétiques du point à 50% de réponses correctes T_{50} moyen de chaque cible (45, 60, 75 dB SPL) pour la tâche de détection de modulation de l'expérience 2 sur un intervalle dépendant des seuils de détection de chacune des cibles :[$(Depth_{threshold} - 2)(Depth_{threshold} + 10)$]

2.3 Présentation et Analyse des seuils mesurés lors de la phase préliminaire

La phase préliminaire peut être considérée comme la condition idéale pour la détection de modulation comparé à la tâche principale, car il n'y a pas de variation de niveau sonore dans le stimulus (mis à part le roving de +/-2 dB); Les valeurs de seuils à partir desquelles nous avons défini un ensemble de profondeurs de modulation par cible pour la tâche principale sont présentés dans la figure 4.4 pour chaque sujet. Ainsi nous observons un effet de niveau de la cible commun à tous les sujets. Il est globalement plus simple de détecter la cible de niveau sonore le plus élevé comme l'ont déjà montré plusieurs études (par ex., Wojtczak and Viemeister (1999)).



FIGURE 4.4 – Seuils de détection de modulation pour chaque cible et chaque sujets.

Nous avons également effectué une analyse de la variance à mesures répétées pour étudier la tendance suivie par chacun des sujets. Ainsi, il était intéressant d'observer si les différences entre les seuils de détection des cibles variaient de façon équivalente pour tous les sujets. Nous avons donc trouvé un effet significatif du niveau de la cible (F(1,4) = 72, p<0.0001). Ainsi nous trouvons en moyenne un écart de 3 dB entre les seuils des cibles à 45 et 60 dB SPL et entre les cibles à 60 et 75 dB SPL, soit un écart moyen de 6 dB entre les cibles à 45 et 75 dB SPL. Ces données sont en accord avec les résultats de Wojtczak and Viemeister (1999) lorsqu'ils ont voulu mettre en évidence un effet de niveau sur la détection de modulation en utilisant un paradigme différent. Notre paradigme n'ayant, à notre connaissance, jamais été utilisé dans le passé, il est rassurant d'observer des résultats cohérents avec la littérature et homogènes entre les sujets. Cet effet de niveau est intéressant car commun à tous les sujets. Nous pourrions alors nous en émanciper lors de l'étude.

2.4 Analyse des résultats bruts

Nous avons appliqué une régression comme décrite précédemment (c.f. IV.2.1), aux données obtenues pour chaque cible, par HPR et par sujet. Nous présentons dans les Figure 4.5 et 4.6 les *fits* obtenus pour deux sujets qui ont montré des résultats différents. Chaque graphique de la Figure 4.5 représente les données obtenues pour une cible fixe mesurées dans plusieurs HPRs (les 3 distributions de la Fig. 4.1. L'axe des abscisses représente profondeurs de modulation auxquelles la tâche était effectuée, soit l'intervalle [$(Depth_{threshold} - 2)(Depth_{threshold} + 10)$]. La Figure 4.6 montre les mêmes données mais chaque graphique la constituant regroupe les données pour une HPR fixe et plusieurs niveaux de cible. pour une HPR données les performances d'un sujet pour chaque cible. Pour permettre une meilleure visualisation des résultats, l'axe des abscisses représente ici un intervalle relatif allant de -2 à 10 dB, 0 étant la valeur de seuil mesuré pour chaque cible dans la phase préliminaire.



FIGURE 4.5 - Représentation pour deux sujets des courbes psychométriques d'une cible (45,60,75 dB SPL) pour chaque HPR (45,60,75 dB SPL)



FIGURE 4.6 – Représentation des courbes psychométriques des cibles de deux sujets pour chaque HPR (45,60,75 dB SPL) sur l'intervalle $[(Depth_{threshold} - 2)(Depth_{threshold} + 10)]$ dépendant du seuil mesuré de la cible

Nous observons un effet marqué du niveau de la cible dans la Figure 4.5. Ainsi il semble que pour les deux sujets, la cible à 75 dB SPL présente des résultats homogènes quelque soit la HPR, alors que les fonctions psychométriques des deux autres cibles sont influencées par la HPR. Nous constatons cependant que la difficulté de détection de la cible semble augmenter avec le niveau de la HPR.

Il est intéressant de voir que dans la Figure 4.6, les performances des sujets ne sont pas systématiquement meilleures pour la cible à 75 dB, invitant à émettre l'hypothèse d'une interaction entre les paramètres de niveau sonore des cibles et les HPR. En effet, dans un certain contexte sonore, la première intuition réfutée ici, serait que la cible à 60 dB SPL est mieux détectée. La même observation est faite dans la HPR à 60 dB SPL pour la cible à 60 dB SPL. A l'inverse, le sujet 3 semble avoir plus d'aisance globalement pour la cible à 75 dB SPL. Une certaine diversité des réponses des sujets est exposée ici. Nous allons étudier l'existence éventuelle d'une tendance commune pour l'ensemble des résultats obtenus.

2.5 Mesure et Analyse des T_{50} : Etude du décalage des fonction psychométriques

2.5.1 Resultats individuels

Les deux résultats de la partie précédente sont 2 exemples sur les 5 sujets que nous avons testés. Pour des résultats plus objectifs et globaux, nous avons mesuré la valeur de la profondeur de modulation exprimée en dB au niveau du point d'inflexion T_{50} de chaque fonction psychométrique. Ces valeurs de profondeurs de modulation correspondent à celles montrées sur la Figure 4.5. La comparaison de ces valeurs nous permet d'évaluer le décalage de la courbe psychométrique d'une cible en fonction de la HPR. En effet plus la valeur de T_{50} est grande par rapport à une valeur de référence, plus la détection de la modulation d'un sujet pour une cible donnée s'est détériorée.

Voici une comparaison pour chaque sujet de l'évolution du T_{50} d'une cible en fonction de la HPR (Figure 4.7).



FIGURE 4.7 – position en dB du point à 50% de réponses correctes T_{50} de chaque cible (45,60,75 dB SPL) pour la tâche de détection de modulation de l'expérience 2. Les résultats sont présentés pour 5 sujets différents. Nous pouvons évaluer l'évolution de T_{50} en fonction de la HPR.

Nous pouvons observer une détérioration globale du T_{50} pour l'ensemble des cibles pour tous les sujets en fonction du niveau moyen de la HPR. Ainsi les performances pour chaque sujet sont en général meilleures pour une HPR à 45 dB SPL. Dans son ensemble, $T_{50}(45)$ est supérieur à $T_{50}(60)$ et $T_{50}(75)$. Cette observation est l'expression de l'effet de niveau.

 $T_{50}(45)$ se décale généralement plus que les autres au fil des HPR ainsi pour les sujets 2, 3, 4, la pente de l'évolution de $T_{50}(45)$ est la plus grande. Parallèlement, la pente de $T_{50}(75)$ est la plus faible, ce qui signifie que les performances des sujets pour détecter une cible à 75 dB SPL évoluent peu pour les différentes HPR. Une étude comparative des coefficients directeurs pour chaque cible via une régression linéaire est entre autres effectuée par la suite.

Nous souhaitons maintenant regarder et analyser les résultats globaux. Nous avons fait la moyenne par cible et par HPR des T_{50} pour chaque sujets (Figure 4.8).



FIGURE 4.8 – Moyenne des T_{50} pour les 3 cibles en fonction de la HPR

Nous observons dans un premier temps l'effet de niveau exposé dans la Figure 4.4. De même il est visible que plus le niveau de la HPR augmente, plus il est difficile de faire la tâche. Cependant cette détérioration semble être bien plus forte pour les cibles à 45 dB SPL et 60 dB SPL. En effet, la détection de la cible à 75 dB semble moins se dégrader en comparaison aux deux autres cibles.

Ce constat nous amène à penser qu'il existe une influence de nos deux paramètres (niveaux de la cible et niveau de la HPR) mais que de plus, une interaction entre ces deux paramètres semble présente, ce qui pourrait être l'expression d'une adaptation. Le fait notamment de ne pas avoir une évolution "parallèle" des trois T_{50} en fonction de la HPR suggère une telle interaction. Cependant, comme cela est présenté dans nos hypothèses, pour que cette adaptation soit évidente dans nos résultats, il faudrait que la détection de la cible à 75 dB SPL soit meilleure dans une HPR à 75 dB SPL plutôt que la HPR à 45 dB SPL, ce qui n'est pas le cas ici. Nous avons effectué une ANOVA à mesures répétées sur nos données en prenant en compte les deux facteurs

de niveau sonore, celui de la cible et celui de la HPR. Voici dans le Tableau 4.2 les résultats de l'analyse avec p l'indice de significativité qui, s'il est inférieur à 0.05 témoigne d'une influence significative du paramètre en question.

Ainsi, chacun de nos paramètres a une influence significative sur notre capacité à détecter la modulation. De plus le fait qu'une interaction entre niveau de cible et niveau de HPR soit significative va dans le sens d'un effet de l'adaptation à la gamme dynamique telle qu'observée par Dean et al. (2005). Autrement dit, il existe un effet différent de la HPR pour chaque niveau de cible.

Dans le but de comparer l'évolution de la détection de modulation en s'émancipant de l'effet de ni-

Paramètre étudié	DL	DL de l'erreur	F	p
Niveau sonore de la cible	2	8	170.67	< 0.00001
Niveau sonore de la HPR	2	8	56.98	< 0.0001
Niveau sonore de la cible x Niveau sonore de la HPR	4	16	4.05	0.02

TABLE 4.2 – Tableau de résultats de l'ANOVA faite sur les résultats globaux de l'expérience 2 avec DL : degré de liberté, F : le rapport des variances et p : indice de significativité.

veau, nous nous plaçons dans le référentiel du support pour chacune de nos cibles, soit : $[(Depth_{threshold} - 2)(Depth_{threshold} + 10)].$



FIGURE 4.9 – Moyenne des T_{50} replacé dans le support $[(Depth_{threshold} - 2)(Depth_{threshold} + 10)]$ pour les 3 cibles en fonction de la HPR

La Figure 4.9 nous montre des résultats appuyant nos premières observations. Ainsi il est globalement plus difficile de détecter une cible à 45 dB SPL dans nos 3 conditions (soit un $T_{50}(45)$ en moyenne élevée) qu'une cible à 60 dB SPL ou encore une cible à 75 dB SPL.

Une nouvelle ANOVA à mesure répétée sur nos résultats dans ce référentiel, nous montre une interaction toujours significative entre les paramètres (Tab. 4.3), malgré la réduction de l'effet de niveau relevé précédemment.

Quantification et identification de l'interaction : Par la suite nous avons tenté de caractériser cette interaction par l'évolution des T_{50} de chacune de nos cibles. Ainsi nous avons déjà remarqué précédemment que la variation du T_{50} en fonction de la HPR, était différente pour les trois cibles, bien qu'elles ont la même tendance (voir Fig. 4.9). Nous avons essayé par deux méthodes différentes de relier cette évolution avec l'interaction des paramètres.

Paramètre étudié	DL	DL de l'erreur	F	p
Niveau sonore de la cible	2	8	12.51	0.3%
Niveau sonore de la HPR	2	8	55.25	$<\!0.001\%$
Niveau sonore de la cible x Niveau sonore de la HPR	4	16	3.97	2%

TABLE 4.3 – Tableau de résultats de l'ANOVA faite sur les résultats globaux de l'expérience 2 translaté dans le support $[(Depth_{threshold} - 2)(Depth_{threshold} + 10)].$

Nous avons tracé pour chaque cible de chaque sujet une **régression linéaire** des T_{50} . Nous avons ensuite effectué une analyse de la variance des coefficients directeurs des droites issues de ces régressions linéaires. Cette grandeur n'a pas de réalité physique mais nous permet de comparer cette évolution. Bien que nous trouvions des différences significatives entre les cibles à 75 et 60 dB SPL (p = 0.04) ce n'est pas le cas entre les cibles à 45 et 75 dB SPL, pourtant nous espérions avec nos hypothèses, trouver plus de différences entre ces deux derniers. En effet les interactions entre ces deux cibles et les HPR de même niveau doivent donner des résultats opposés. Cela est surement dû à un manque de données.

2.6 Expression de l'interaction

Après que que l'interaction entre nos deux paramètres ait été observée, nous nous sommes interrogés sur la nature de cette interaction. Nous avions émis l'hypothèse que l'adaptation à la gamme dynamique devrait influencer la détection de modulation de chaque cible de manière analogue à ce que nous avons présenté dans la Figure 4.3. Force est de constater que nous ne retrouvons pas ce "croisement" des seuils pour chaque cible (voir Fig. 4.3) mais que nous observons tout de même une détérioration de la détection de modulation en fonction du niveau de la HPR différente suivant le niveau de la cible.

Cette interaction semble pouvoir être expliquée par une adaptation "classique" du taux de décharge au stimulus présenté (baisse globale du taux de décharge face à un niveau sonore continu). Ainsi l'adaptation du taux de décharge à un niveau sonore de la HPR aura pour effet de comprimer la fonction entrée-sortie des neurones. Il serait alors plus difficile de détecter une modulation sur les intervalles subissant cette adaptation. Un exemple de cette détérioration de la détection de modulation par une adaptation classique du taux de décharge serait le cas d'une cible à 45 dB SPL dans une HPR à 75 dB SPL en comparaison à cette même cible dans une HPR à 45 dB SPL.

Dans un cas extrême, l'origine de ces résultats pourrait être le masquage proactif engendré par le contexte sonore sur la cible. Si le contexte sonore est tellement élevé qu'il affecte l'audibilité de la cible, il est clair que la détection de modulation devrait être plus difficile. Le masquage proactif est décrit par Wen et al. (2009) comme une conséquence possible de l'adaptation classique du taux de décharge ⁴. Pourtant le fait que pour chacune de nos cibles, au moins une profondeur de modulation donne 100% de réponses correctes, il est clair que les trois cibles sont audibles en toutes circonstances. Il reste possible, cependant, que dans le cas d'une HPR élevée (75 dB SPL), les cibles à bas niveau soient partiellement masquées, c'est à dire que les premières périodes de la modulation soient inaudibles. Nous pourrions concevoir une procédure adaptative permettant de quantifier la portion du signal masqué par le contexte. Il serait alors possible d'insérer un silence d'une durée correspondante au temps pour lequel le masque est actif sur un intervalle. Nous pourrions ainsi nous préserver de cet effet.

Le manque de données a peut-être également un impact sur l'allure de nos résultats. Avec plus de données, il serait intéressant de comparer la variation de T_{50} de deux cibles dans des états similaires comme la variation de $T_{50}(45)$ entre les HPR de 45 et 60 dB SPL et la variation de $T_{50}(60)$ entre les HPR de 60 et 75 dB SPL. En effet pour ces deux variations, la différence entre le niveau de cible et le niveau de la HPR est le même. De même il est intéressant de soulever que seul $T_{50}(60)$ semble montrer une linéarité en fonction des HPR, alors que les autres ont l'air de converger vers une borne supérieure pour la cible à 45 dB SPL et vers une borne inférieure pour la cible à 75 dB SPL. Ces effets essentiellement remarquables graphiquement pourraient être les fragments d'un motif pouvant apparaître sur chaque cible si les conditions étaient les mêmes pour chaque cible.

^{4.} une telle théorie pourrait être illustrée par l'image du serpent qui se mord la queue

Pour conclure, rien ne nous permet de dire que les effets observés sont le résultat de l'adaptation de gamme dynamique remarquée dans les études électrophysiologiques.

2.7 Proposition d'amélioration du protocole

A la fin de l'étude, nous avons réfléchi à quelques solutions d'amélioration du protocole que nous n'avons pas eu le temps d'implémenter ou d'expérimenter.

- L'ensemble des valeurs de profondeur de modulation calculées à partir du seuil de perception lui-même mesuré lors de l'entrainement, ne couvre pas toujours le support entier de la fonction psychométrique. Cela est notamment dû à sa définition expérimentale qui est certes optimale pour la zone sensible de la fonction, mais parcimonieuse. Il aurait été intéressant mais très couteux en temps de refaire la même expérience en décalant les valeurs de profondeur de modulation dans une direction ou une autre suivant les performances des sujets. Ainsi nous obtiendrions un plus vaste support de nos valeurs et un meilleur échantillonnage de la fonction psychométrique.
- Nous avions pensé à prolonger le stimulus ce qui pourrait permettre de présenter plus d'une cible par stimulus.
- Il aurait été possible de contourner le problème de fausse alarme énoncé au début de cette partie dans le cas où le sujet répondait avant que la cible apparaisse en refaisant un essai dans les mêmes conditions (même HPR, même cible, même profondeur de modulation) sur la même session.
- Nous pourrions ajouter un silence dont la durée égale le temps pour lequel un intervalle est masqué par l'intervalle précédent.
- Enfin, l'insertion aléatoire et à durée variable d'un silence entre deux sons dans le stimulus pourrait également rendre compte de la constante de temps τ dans laquelle s'active l'adaptation.

Chapitre 5

Conclusion & Perspectives

De manière générale, cette étude a permis d'étudier un comportement atypique du système auditif chez les mammifères. Avec des tests psychophysiques, nous avons tenté de valider l'hypothèse de l'influence du contexte sonore sur notre perception basée sur les observations par des expériences physiologiques de Dean et al. (2005) et Wen et al. (2009) sur des petits mammifères. Sachant qu'il nous est déontologiquement impossible d'observer la réponse des neurones du système auditif sur des humains de manière invasive (comme cela a été fait chez les petits mammifères), le défi de ce stage a été de concevoir un (des) protocole(s) de test perceptif permettant d'observer cet effet. Nous nous sommes heurtés à plusieurs difficultés pour la première expérience, comme la faisabilité du test par les sujets et une utilisation un peu naïve des résultats de la littérature, ne donnant pas à terme de résultats interprétables. Nous n'avons pas eu la possibilité d'estimer la constante de temps d'activation de l'adaptation présentée par Dean et al. (2008) et Wen et al. (2012). Cette étude n'ayant pas abouti, nous avons tiré des leçons de ce premier protocole pour en concevoir un nouveau. Ce dernier test, plus objectif, présentait un stimulus très proche de celui utilisé par Dean et al. (2008) et Wen et al. (2012). Nous avons ainsi pu rendre compte de plusieurs effets, ainsi que d'une interaction entre nos paramètres lors de l'analyse de nos résultats. Alors que nous attendions une preuve plus remarquable de l'influence de l'adaptation à la gamme dynamique (comme une symétrique des tendances des cibles à 45 dB SPL et 75 dB SPL, voir Fig. 4.3), cela n'a pas été le cas et l'interaction pourrait être simplement expliquée par l'adaptation classique du taux de décharge.

En conclusion de notre étude, l'idée de pouvoir expliquer la perception des fluctuations dans l'intensité sonore par l'adaptation de la gamme dynamique des neurones observée par Dean et al. (2005) semble être une "belle" théorie, mais sûrement plus compliquée qu'il n'y parait à mettre en évidence. Il ne faut pas oublier également que les mesures électrophysiologiques ont été effectuées sur des chats et des cobayes, et non des humains. Peut-être que certaines différences subsistent dans le traitement de l'intensité entre les êtres humains et les petits mammifères.

Mais bien que nos résultats ne le montrent pas, il n'est pas impossible que l'adaptation à la gamme dynamique ait une influence sur la détection de modulation. Il est donc encore envisageable de l'observer via un nouveau protocole et/ou stimulus. Il serait intéressant par la suite d'ajouter des paramètres au protocole pour essayer de comprendre où se déclenche l'adaptation de la gamme dynamique. Bien sûr, notre première hypothèse était de situer l'activation de l'adaptation au niveau périphérique du système auditif. Ainsi, un stimulus présenté en configuration controlatérale (contexte dans une oreille, cible dans l'autre), pourrait situer plus exactement l'origine de cette adaptation. En effet, si l'adaptation est déclenchée au niveau périphérique (cochlée-nerf auditif) le contexte appliqué dans une oreille n'aura aucune influence sur la perception de la cible dans l'autre oreille, il n'y aurait alors pas d'adaptation. Une autre façon de vérifier cela serait de changer la fréquence de la cible modulée dans un test pour observer s'il y a toujours une adaptation. Si ce test n'est pas concluant, il se pourrait alors que le phénomène se déclenche à un niveau plus central du système auditif.

De tels résultats nous permettraient de mieux comprendre comment fonctionne le système auditif humain, et plus précisément de mieux définir notre perception de l'intensité. Couplée à une recherche de la localisation de cette adaptation, Notre étude permettrait de repenser le codage de l'intensité dans les implants cochléaires. Si l'hypothèse émise d'un déclenchement de l'adaptation au niveau périphérique est vérifiée, et que son fonctionnement est compris, alors il serait possible de trouve une solution pour l'implémenter dans des implants cochléaires.

Annexe A

Calibration du Casque Sennheiser HDA 200

Dans le but de rétablir la valeur exacte de décibel voulue dans le casque comme présentée dans matlab, nous établissons le profil de transmission du niveau sonore du casque Sennheiser HDA 200. Nous calibrons donc le niveau sonore à 1000 Hz dans le casque à l'aide d'une oreille artificielle, d'un pistonphone, d'un amplificateur (interface entre l'oreille artificielle et le voltmètre) et d'un voltmètre.

Nous commençons par établir la conversion à faire pour retranscrire le niveau sonore transmis par l'oreille interne au voltmètre à l'aide du pistonphone. Un pistonphone est un outil qui délivre un son pur de 100 Hz avec un niveau sonore de 94 dB SPL. Nous lisons ensuite le niveau (en dB μ V) sur le voltmètre. La différence entre le niveau du son du pistonphone et le niveau affiché par le voltmètre nous permettra de retrouver le niveau sonore délivré par le casque. Nous obtenons ainsi une différence de **8.2 dB**.

Via un script matlab, nous présentons un son pur de niveau connu à l'oreille artificielle. Nous ajoutons une atténuation de 30 dB SPL sur la carte son FireFace utilisée qui est l'interface entre l'ordinateur et le casque. Nous souhaitons que le niveau inscrit sur Matlab corresponde au niveau délivré par le casque, nous prenons donc en compte cette atténuation de 30 dB SPL.

Nous effectuons donc un relevé par fréquence tous les 25 Hz sur une plage de 125 à 16 kHz, du niveau délivré par le casque en lisant sur le voltmètre, pour chaque oreillette du casque. Une interpolation nous permet finalement d'avoir un aperçu complet des profils des deux oreillettes présentés ci-dessous (Figure A.1).



FIGURE A.1 – Profil d'atténuation pour les deux oreillettes du casque Sennheiser

L'oreillette utilisée sera la gauche. Comme la première expérience requière un son précurseur à bande étroite, nous souhaitons nous placer sur une zone relativement plane de ce profil tout en gardant une fréquence relativement basse pour ne pas que le stimulus soit désagréable pour le sujet. C'est pourquoi l'ensemble de nos signaux serons de fréquence centrale **2000 Hz**.

Enfin voici, la conversion opérée sur chacun des signaux qui seront présentés lors de nos tests.

$$SL_{input} = -(Tension + 8.2) - (-30) - A_{sine}) - SL_{output} - A_{signal}$$

avec SL_{input} la valeur de dB FS lue par Matlab, Tension la tension en dB μ V lue sur le voltmètre, A_{sine} l'amplitude RMS d'une sinusoïde, SL_{output} l'amplitude désirée du signal en dB SPL en sortie du casque, et A_{signal} l'amplitude en dB FS du signal.

La valeur en sortie du casque a été vérifiée en évaluant le son en sortie du casque grâce à une oreille artificielle reliée à une autre carte son Focusrite. Ainsi, nous avons pu confirmé que les signaux présentés avaient le bon niveau sonore.

Annexe B

Stimuli de la première expérience

Voici une représentation graphique simplifiée de chacun des stimuli présentés dans le premier protocole. L'apparition de la modulation est aléatoire sur le signal cible (loi binomiale $| \mathbf{p} = 1/2$). Le niveau sonore de la cible est de **45 dB SPL**.

Soit l'ensemble des conditions que devras traiter le sujet via une procédure adaptative (Tab. B).

Type	Nature du précurseur	Nature du gap
0	(2 secondes de silence)	/
1	même niveau sonore que la cible	silence court
2	même niveau sonore que la cible	silence long
3	niveau sonore différent de la cible	silence court
4	niveau sonore différent de la cible	silence long

Voici donc avec les valeurs numériques utilisées les schémas des différentes conditions pour l'expérience 1 $(T_{silence} : Durée du silence, NS : Niveau sonore du précurseur)$

Type	Nature du précurseur et du silence	Schéma	
0	$T_{ij} \rightarrow 2s$		SILENCE
U	I silence · 2 5		
		•	- SILENCE
			\checkmark
1	$\mathrm{NS}:45~\mathrm{dB}~\mathrm{SPL}~T_{silence}:150~\mathrm{ms}$	PRECURSEUR CI	BLE
2	NS : 45 dB SPL $T_{silence}$: 1.5 s	PRECURSEUR	SILENCE
3	$NS: 75 \text{ dB} \text{ SPL } T_{silence}: 150 \text{ ms}$	PRECURSEUR	- SILENCE
4	$\mathrm{NS}:75~\mathrm{dB}~\mathrm{SPL}~T_{silence}:1.5~\mathrm{s}$	PRECURSEUR	CIBLE

Annexe C

Instructions expérience n^o1

Lors de ce test, il vous sera présenté plusieurs sons à l'oreille gauche appelés des Stimuli. Le dernier son de chaque stimulus (le signal cible) sera tantôt modulé en amplitude, tantôt non-modulé. Voici une représentation graphique des deux types de signaux cibles pour aider à la compréhension.



Il vous sera alors demandé, via une interface graphique (voir ci-dessous), d'indiquer si "oui" ou "non" vous entendez cette modulation. La cible pourra prendre deux niveaux sonores (ou intensités) différents.

Lorsque la barre de chargement arrivera à son terme, le signal cible se fera entendre dans l'oreillette gauche. Avant la cible, il vous sera présenté différents sons précurseurs par la même oreillette, des bruits pour lesquels nous ne vous demanderons pas de détecter quoi que ce soit. Il est important de préciser que la modulation va dans un premier temps être "évidente" puis va, en fonction de vos résultats, varier. Elle pourra alors devenir très fine, demandant une attention accrue.

Un "Feedback" vous sera présenté après chacune de vos réponses : un cadre s'illuminera en vert si la réponse est correcte et en rouge sinon. Ce test, précédé d'un audiogramme se compose de deux parties : un entrainement, et une tâche principale.

CEBox
MODULATION DETECTION TASK
Can you hear a modulation on the target signal ?
Feedback
YES NO
Context in progress
Barre de chargement

Lors de l'entrainement, il vous sera présenté la cible seule (audible chaque fois que la barre de chargement est remplie). Vous devrez alors préciser si le signal est modulé ou non. N'oubliez pas que vite, la modulation devient très fine et difficile à entendre.

Lors de la tâche principale, vous entendrez des sons précédant le signal cible dont le niveau sonore et la durée variera. Il y aura 5 configurations différentes à chaque fois, formant ainsi un bloc dont la durée d'exécution avoisine les 20-25 minutes.

L'expérience s'étalera sur **trois séances de deux heures**. Une première séance sera consacrée à l'entrainement. Lors de la deuxième et la troisième séances, nous nous concentrerons essentiellement sur la tâche.

Annexe D

Instructions expérience n^o2

Ce test a été pensé dans le but de mieux comprendre la perception de l'intensité sonore chez l'homme. La tâche au coeur de ce test est une détection de modulation. Voici sur la figure ci-dessous une représentation d'un son non-modulé et d'un son modulé.



Phase préliminaire

Chaque test commence par une audiométrie.

Lors de ce test, il vous sera présenté un certain nombre de stimuli d'une durée approximative de 7 secondes sur votre oreille gauche. Ce stimulus est composé de plusieurs sons purs enchainés dont le niveau sonore varie. L'un de ces sons est modulé. Il vous est demandé de repérer l'échantillon modulé au sein du stimulus en appuyant sur la touche "espace" du clavier dès que la modulation est entendu. Il n'y a qu'une seule modulation pour chaque stimulus, par conséquent vous n'avez qu'une chance de répondre à chaque essai. Une pression sur la touche "0" du clavier permet de passer à l'essai suivant. Nous cherchons à évaluer quel est votre seuil de perception d'une modulation dans différentes conditions, c'est pourquoi la modulation deviendra plus ou moins difficile a détecter en fonction de votre réponse. Un *Feedback* vous sera présenté après chacune de vos réponses : un cadre s'illuminera en vert si la réponse est correcte et en rouge sinon. Vous n'êtes pas obligé de répondre si vous n'entendez pas la modulation. Dans ce cas attendez la fin du stimulus pour passer à l'essai suivant.

La phase préliminaire se déroule en 4 blocs. Chacun de ces blocs est composé de 3 procédures adaptatives d'environ 5 minutes.

Tâche principale

Le protocole pour la tâche principale est semblable à celui de la phase préliminaire. Le stimulus aura un niveau sonore avec une plus grande gamme de variation. Les modulations sont positionnées aléatoirement dans le stimulus. Etant donné que nous n'évaluons plus le seuil de perception ici, la difficulté de détection variera aléatoirement au fil des essais. Vous aurez 24 essais par bloc ($\sim 4-5$ minutes), 5 blocs par sessions et enfin 3 sessions par séance. L'expérience s'articulera autour de 6 séances. La première permettra de faire la phase préliminaire et par la suite de faire 3 sessions. Ensuite, 5 séances d'une heure et demi permettront d'obtenir le nombre de données dont nous avons besoin.

Bibliographie

- Isabel Dean, Nicol S Harper, and David McAlpine. Neural population coding of sound level adapts to stimulus statistics. *Nature neuroscience*, 8(12) :1684–1689, 2005.
- Isabel Dean, Ben L Robinson, Nicol S Harper, and David McAlpine. Rapid neural adaptation to sound level statistics. The Journal of Neuroscience, 28(25):6430–6438, 2008.
- Christian Kaernbach. A single-interval adjustment-matrix (siam) procedure for unbiased adaptive testing. The Journal of the Acoustical Society of America, 88(6):2645–2655, 1990.
- HCCH Levitt. Transformed up-down methods in psychoacoustics. The Journal of the Acoustical society of America, 49(2B) :467–477, 1971.
- Martin Pienkowski and Bjorn Hagerman. Auditory intensity discrimination as a function of level-rove and tone duration in normal-hearing and impaired subjects : the "mid-level hump" revisited. *Hearing research*, 253(1):107–115, 2009.
- Christopher J Plack and Robert P Carlyon. Loudness perception and intensity coding. *Hearing*, pages 123–160, 1995.
- Evan M Relkin and John R Doucet. Is loudness simply proportional to the auditory nerve spike count? The Journal of the Acoustical Society of America, 101(5) :2735–2740, 1997.
- Andrew JR Simpson, Nicol S Harper, Joshua D Reiss, and David McAlpine. Selective adaptation to "oddball" sounds by the human auditory system. The Journal of Neuroscience, 34(5) :1963–1969, 2014.
- Ningyuan Wang, Heather A Kreft, and Andrew J Oxenham. Loudness context effects in normal-hearing listeners and cochlear-implant users. Journal of the Association for Research in Otolaryngology, 16(4): 535–545, 2015.
- Bo Wen, Grace I Wang, Isabel Dean, and Bertrand Delgutte. Dynamic range adaptation to sound level statistics in the auditory nerve. *The Journal of Neuroscience*, 29(44) :13797–13808, 2009.
- Bo Wen, Grace I Wang, Isabel Dean, and Bertrand Delgutte. Time course of dynamic range adaptation in the auditory nerve. *Journal of neurophysiology*, 108(1):69–82, 2012.
- Magdalena Wojtczak and Neal F Viemeister. Intensity discrimination and detection of amplitude modulation. The Journal of the Acoustical Society of America, 106(4) :1917–1924, 1999.
- Magdalena Wojtczak and Neal F Viemeister. Forward masking of amplitude modulation : Basic characteristicsa). The Journal of the Acoustical Society of America, 118(5) :3198–3210, 2005.