



THÈSE

En vue de l'obtention du

DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

Délivré par :

Institut Supérieur de l'Aéronautique et de l'Espace

Présentée et soutenue par :

Emilie JAHANPOUR

le mardi 17 décembre 2019

Titre :

Développement et mise en œuvre d'une approche psycho-physio-acoustique pour le contrôle temps réel de l'impact du bruit en cabine d'hélicoptère

École doctorale et discipline ou spécialité :

ED AA : Neurosciences, comportement et cognition & Acoustique, Sciences du Langage

Unité de recherche :

Équipe d'accueil ISAE-ONERA EDyF & Commande des systèmes et dynamique du vol

Directeur(s) de Thèse :

M. Frank SIMON (directeur de thèse)

M. Mickaël CAUSSE (co-directeur de thèse)

Jury :

M. Etienne PARIZET, Professeur des Universités INSA Lyon - Président et rapporteur

M. Guillaume ANDEOL, Maître de recherche Institut de Recherche Biomédicale des Armées -
Rapporteur

M. Mickaël CAUSSE, Professeur des Universités ISAE-SUPAERO - Co-directeur de thèse

Mme Catherine LAVANDIER, Professeure des Universités Université Cergy-Pontoise, ENSEA

M. Fabrice PARMENTIER, Professeur des Universités University of the Balearic Islands

M. Frank SIMON, Directeur de Recherche ONERA Toulouse - Directeur de thèse

A mon papa

Résumé

Le bruit environnemental a des effets bien connus sur l'humain. A court terme, il peut être source de stress, de fatigue, ou de déconcentration. Pour autant, la littérature montre des effets complexes, il peut par exemple être source de plaisir et de motivation. Dans le domaine de l'acoustique hélicoptère, le bruit en cabine est particulier parce qu'il possède une large gamme de fréquence (10-10000Hz). Le bruit de la boîte de transmission principale est particulièrement désagréable parce qu'il s'agit d'un bruit de type tonal dans des gammes de fréquences (500-3000 Hz) proches de la parole (200-6000Hz) auxquelles l'humain est très sensible. Les passagers émettent le désir de pouvoir travailler, lire et se reposer sans être gêné, ainsi, un enjeu pour les constructeurs consiste à améliorer le confort sonore en cabine. Pour réduire ce bruit, une solution est d'utiliser le contrôle actif. Airbus Helicopters a développé un système d'appui-tête intégrant des haut-parleurs et des microphones permettant de générer une zone autour de la tête des passagers dans laquelle le contrôle actif est réalisé. L'ajout d'un algorithme multi-tonalité, visant à filtrer uniquement les tonalités émergentes, permet un gain allant jusqu'à 4 dB(A), ce qui représente une réduction de l'inconfort de 15%. L'objectif de cette thèse était de définir s'il est pertinent de filtrer toutes ces tonalités en fonction de l'activité courante du passager. Autrement dit, cette thèse visait à mieux cerner l'impact de différents bruits de cabine d'hélicoptère sur les performances cognitives et le confort des passagers, grâce à des mesures subjectives, comportementales (performance, oculométrie) et psychophysiologiques (électroencéphalographie, électrocardiographie). Afin de simuler l'activité d'un passager, trois tâches ont été sélectionnées : une tâche de « travail » (combinant calcul mental, raisonnement et mémoire de travail), une tâche de lecture et enfin une tâche de repos. Les résultats ont été comparés avec ceux obtenus par l'échelle de confort acoustique développée par Airbus Helicopters. Nous retrouvons une bonne correspondance entre cette échelle et nos résultats. Par ailleurs, nos résultats comportementaux et psychophysiologiques font apparaître qu'une exposition courte aux sons d'hélicoptères n'a généralement que très peu d'effets délétères sur les performances aux tâches et ne crée qu'une faible augmentation du niveau de stress, observable par l'activité cérébrale et cardiaque. Cependant, le ressenti subjectif est le plus impacté par le bruit, avec un ressenti négatif associé aux bruits ayant le plus de tonalités.

Mots clefs : Bruit d'hélicoptère, Psychoacoustique, Mesures physiologiques, Confort acoustique, Performances cognitives

Abstract

Development and implementation of a psycho-physio-acoustic approach for real-time control of noise impact in helicopter cabins

Environmental noise has well-known effects on humans. In the short term, it can be a source of stress, fatigue, or decreased alertness. However, the literature shows complex effects, it can, for example, be a source of pleasure and motivation. In the field of helicopter acoustics, cabin noise is particular because it has a wide frequency range (10-10000Hz). The noise of the main transmission gearbox is particularly unpleasant because it is tonal noise in frequency ranges (500-3000 Hz) close to speech (200-6000 Hz) to which humans are very sensitive. Passengers want to be able to work, read and rest without being annoyed, so one challenge for manufacturers is to improve sound comfort in the cabin. To reduce this noise, one solution is to use active noise control. Airbus Helicopters has developed a headrest system integrating speakers and microphones to generate an area around the passenger's head in which active noise control is performed. The addition of a multi-tone algorithm, designed to filter only emerging tones, allows a gain up to 4 dB(A), which represents a 15% reduction in discomfort. The purpose of this thesis was to define whether it is relevant to filter all these tones according to the passenger's current activity. In other words, this thesis aimed to better understand the impact of different helicopter cabin noises on cognitive performance and passenger comfort through subjective, behavioural (performance, oculometry) and psychophysiological (electroencephalography, electrocardiography) measurements. In order to simulate a passenger's activity, three tasks were selected: a "working" task (combining mental calculation, reasoning, and working memory), a reading task and finally a resting task. The results were compared with those obtained by the acoustic comfort scale developed by Airbus Helicopters. We find a good correspondence between this scale and our results. In addition, our behavioural and psychophysiological results show that, generally short exposure to helicopter noises has limited deleterious effects on task performance and creates only a slight increase in stress level, observable through the cerebral and cardiac activity. However, the subjective feeling is most impacted by noise, with a negative feeling associated to the noises with the most tones.

Keywords: Helicopter noise, Psychoacoustics, Physiological measurements, Acoustic comfort, Cognitive performance

Remerciements

J'ai longtemps pensé que réaliser une thèse était réservé à une élite à laquelle je ne faisais pas partie. Finalement, bien que ce fût une expérience intense, ça ne m'aura pas paru plus difficile qu'autre chose parce que j'y ai pris énormément de plaisir. Ma thèse aura été une expérience extrêmement enrichissante sur tellement de points différents. J'ai beaucoup muri durant ces trois années et j'ai davantage confiance en mon travail, ce qui me permettra de grandir encore en tant chercheuse.

Naturellement, j'aimerais commencer par remercier mes directeurs de thèse, Mickaël et Frank, sans qui cette thèse n'aurait pas eu lieu. Je n'étais peut-être pas la meilleure candidate pour relever le défi de ce sujet pluridisciplinaire. Les discussions n'auront pas été faciles en raison de vos domaines d'expertise différents mais finalement on s'en est bien sorti. Et je me suis d'ailleurs moi-même surprise à adorer travailler sur ce sujet qui m'a permis de découvrir le monde de l'acoustique. Vous m'avez accordé une grande liberté qui m'a permise d'explorer en profondeur et d'apprendre tellement de choses. Et malgré cette grande liberté, vous étiez là pour me guider lorsque je m'empêtrai dans mon perfectionnisme. Comme je l'ai appris grâce à toi Mickaël, « le mieux est l'ennemi du bien ». Frank, tu n'imagines pas à quel point ta bienveillance à mon égard m'aura fait du bien. J'ai toujours eu peur de vous décevoir tous les deux mais ce ne fut jamais le cas, vous étiez toujours là pour m'encourager. Donc merci de m'avoir fait confiance pour ce sujet.

J'aimerais également remercier l'école doctorale Aéronautique & Astronautique de m'avoir attribué une bourse doctorale afin de mener à bien ce projet. Le fait qu'elle soit à taille humaine permet vraiment de se sentir bien encadré et de resserrer les liens entre doctorants qui ont des sujets si particuliers.

Je souhaite remercier les membres de mon jury de thèse d'avoir accepté d'évaluer ce travail, la discussion aura très enrichissante pour moi et mon manuscrit en ressortira grandement amélioré. Merci encore pour tous les efforts que vous avez fournis pour être présent et que la soutenance se déroule bien le jour escompté.

J'aimerais maintenant remercier toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à ce travail de thèse. Notamment tous mes participants volontaires, sans qui toutes ces expériences et ce travail de recherche n'auraient pas eu lieu.

Merci Delphine pour ton aide sur la manip acoustique. Tu auras pris beaucoup de temps pour m'expliquer et réaliser les manip avec moi. Et je te remercie de m'avoir prêté pendant si longtemps ton ampli, en espérant qu'il ne t'aura pas trop manqué.

Je voulais remercier Julien et Lauriane d'Airbus Helicopters pour les signaux d'hélicoptères et l'équation de confort qui m'ont été fournis.

Merci Cécile pour l'aide précieuse que tu auras apporté durant ton stage, me permettant d'explorer de nouvelles pistes. Ma première expérience de maîtresse de stage aura été très agréable avec toi.

Camille, j'aimerais te remercier parce que si j'en suis ici maintenant c'est grâce à toi. C'est toi qui m'as donné envie de faire une thèse après mon master. Avec toi j'ai eu l'impression que faire de la recherche n'était pas aussi dur que ce que je m'imaginai. Tu as été et tu restes une grande source d'inspiration et de motivation pour moi.

Merci Eve de m'avoir fait confiance pour mon stage de recherche. Sans ce stage je n'aurai sûrement jamais fait cette thèse. Et tu auras été d'une grande aide pour obtenir ma bourse.

Kevin, sans toi ma thèse aurait été bien différente. Je n'arrive même pas à imaginer ce à quoi ça aurait pu ressembler tellement j'ai l'impression que tu m'as été indispensable au cours de ces trois années. Tu as été mon mentor Matlab, tu m'as tout appris et c'est grâce à toi que je suis maintenant devenue autonome. Et même si je ne t'appellerai peut-être plus pour te demander de l'aide, je t'appellerai maintenant pour te montrer à quel point je suis fière de mes scripts réalisés toute seule. J'aurais partagé tellement d'expériences enrichissantes avec toi. On aura vécu toutes les étapes de la thèse ensemble : les conférences, les formations, les expériences, la rédaction et pour finir la soutenance. Je te suis juste reconnaissante d'avoir partagé tout ça avec moi, je ne me suis jamais sentie seule dans ces moments (difficiles comme agréables) parmi lesquels on peut passer au court d'une thèse.

Merci les garçons, Chris, Quentin et Kevin d'avoir partagé et animé notre fameux bureau de doctorants #10.121. Cette synergie qu'on s'est créé grâce à nos personnalités si différentes va beaucoup me manquer. On aura partagé beaucoup de joyeux moments dans ce bureau et on aura toujours été présents les uns pour les autres pour s'écouter, se conseiller, se soutenir et surtout s'amuser. Vous avez été mes premiers cobayes pour tester mes expés et je vous remercie pour ça. Merci Chris d'avoir fait n'importe quoi et de m'avoir fait autant rire. Merci Rébaï pour ces longues et tardives discussions sur la vie et les relations humaines pour lesquelles on n'est pas beaucoup plus avancés =). Et merci de m'avoir changé les idées grâce à ces parties de VR endiablées ! Merci Alma pour tes bons conseils, notre petit rituel du matin m'a beaucoup manqué lorsque tu es partie.

Merci à toute l'équipe Facteurs Humains et Neuroergonomie de l'ISAE. Je n'ai pas énormément d'expérience dans d'autre labo mais l'ambiance m'aura semblé

exceptionnelle, que ce soit d'un point de vue professionnel et non-professionnel. Mes souvenirs ont un goût de colonie de vacances #TMTC #soirées #conf #leskic'estlavie #ridefever. J'ai commencé avec de simples collègues et je termine avec de véritables amis.

Côté ONERA j'aimerais remercier Jérémie, Anthony, Rémi et Sylvain mes collègues doctorants acousticiens. Merci d'avoir répondu aux questions très naïves sur l'acoustique qui m'ont énormément aidées à mes débuts. Jérémie tu auras été un super co-bureau le peu de temps que j'aurai passé là-bas. Merci Jeanne d'avoir partagé beaucoup de moments chouettes avec moi. A tous les autres doctorants et stagiaires de l'ONERA, vous avez rendu mon accueil là-bas vraiment très sympathique et agréable, ce qui aura rendu le choix de mon « camp » plus difficile.

Je remercie également les membres de mon jury d'avoir accepté d'évaluer mon travail. Merci pour les efforts que vous avez fournis pour être présents malgré les grèves le jour de la soutenance.

Merci à Evelyne, Rébaï et ma maman pour les corrections des erreurs d'étourderie sûrement dues à la fatigue de la rédaction.

Merci à ma famille d'avoir été présente et de m'avoir soutenue le jour de la soutenance, c'est un moment que je ne suis pas prête d'oublier.

Et pour finir, merci Valentin de m'avoir supporté et encouragé durant mes moments de doutes, tu me connais par cœur et tu sais que je peux y arriver. Merci encore d'avoir accepté que ma thèse empiète un peu sur ma vie perso.

C'est avec beaucoup de nostalgie et de joie que je termine ce chapitre de ma vie.

Sommaire

INTRODUCTION	27
1. CONTEXTE THEORIQUE ET SCIENTIFIQUE	35
1.1. LE BRUIT D'HELICOPTERE.....	37
1.1.1. Définition du bruit	37
1.1.2. Composition du bruit interne d'hélicoptère.....	37
1.1.3. Réduction passive	40
1.1.4. Réduction active	40
1.1.4.1. Définition du contrôle actif	40
1.1.4.2. Réduction active du bruit en cabine d'hélicoptère	42
1.1.4.3. Appui-tête actif Airbus Helicopters	44
1.2. PRESENTATION DU SYSTEME AUDITIF HUMAIN.....	45
1.2.1. Anatomie de l'oreille humaine	45
1.2.2. Particularités de l'audition	47
1.3. L'APPORT DE LA PSYCHOACOUSTIQUE	49
1.4. EFFETS DU BRUIT SUR LES PERFORMANCES COGNITIVES	50
1.4.1. Effet du bruit sur l'attention.....	50
1.4.2. Effet du bruit sur la mémoire	52
1.4.3. Effet du bruit sur l'apprentissage.....	53
1.4.4. Effet du bruit sur le niveau de stress	54
1.4.5. Effets du type de tâche et du type de bruit.....	55
1.4.6. Bruit et personnalité	58
1.4.7. Autres modérateurs des effets du bruit sur la performance cognitive	60
1.4.8. Cas particulier du bruit tonal.....	62
1.5. MESURES PSYCHOPHYSIOLOGIQUES DE L'EFFET DU BRUIT.....	63
1.5.1. Électroencéphalographie	63
1.5.1.1. Neuroanatomie.....	63
1.5.1.2. Fonctionnement de l'EEG	64
1.5.1.3. Métriques EEG	66
1.5.1.4. Effets du bruit sur l'activité cérébrale	67
1.5.2. Électrocardiographie	71

1.5.2.1. <i>Fonctionnement de l'ECG</i>	71
1.5.2.2. <i>Effet du bruit sur l'activité cardiaque</i>	72
1.6. EQUATION DE CONFORT D'AIRBUS HELICOPTERS.....	74
1.7. PRESENTATION DES HYPOTHESES DE LA THESE.....	75
2. METHODOLOGIE.....	79
2.1. MATERIEL	81
2.1.1. Salle expérimentale	81
2.1.2. Outils de mesure physiologique et oculométrique.....	82
2.1.3. Restitution sonore.....	84
2.1.3.1. <i>Choix du casque audio</i>	84
2.1.3.2. <i>Choix du support pour les mesures de réponses</i> <i>fréquentielles</i>	85
2.1.3.3. <i>Mesures des réponses fréquentielles du casque</i>	88
2.1.3.4. <i>Diffusion des sons jusqu'au casque</i>	90
2.2. METHODE	91
2.2.1. Participants.....	91
2.2.2. Conditions sonores.....	92
2.2.2.1. <i>Signal d'origine</i>	92
2.2.2.2. <i>Choix des conditions sonores</i>	92
2.2.2.2.1. Son 1 : bruit brut.....	93
2.2.2.2.2. Son 2 : bruit filtré tonalités	93
2.2.2.2.3. Son 3 : bruit filtré hautes fréquences	94
2.2.2.2.4. Son 4 : bruit filtré basses fréquences	95
2.2.2.2.5. Son 5 : filtre isophonique.....	95
2.2.2.2.6. Condition silencieuse	96
2.2.2.3. <i>Application de la fonction de transfert</i>	96
2.2.2.4. <i>Allongement des sons</i>	97
2.2.3. Présentation/Choix des tâches.....	98
2.2.3.1. <i>Tâche 1 de « travail » : Toulouse N-back Task</i>	98
2.2.3.1.1. Mesure de l'empan mnésique	101
2.2.3.2. <i>Tâche 2 de « lecture »</i>	102
2.2.3.3. <i>Tâche 3 de « repos »</i>	105
2.2.4. Tests subjectifs	107
2.2.4.1. <i>Echelle de difficulté</i>	107
2.2.4.2. <i>Echelle de fatigue</i>	107
2.2.4.3. <i>Sensibilité au bruit</i>	108
2.2.4.4. <i>Habitudes d'écoute et environnement sonore</i>	108
2.2.4.5. <i>Personnalité</i>	109

2.2.4.6. Stress SSSQ.....	110
2.2.4.7. Evaluation perceptive du bruit	113
2.2.4.8. Comparaisons par paires.....	114
2.2.5. Procédure.....	114
2.3. TRAITEMENT DU SIGNAL	116
2.3.1. Traitement des données EEG	116
2.3.2. Traitement des données ECG	117
2.3.3. Traitement des données oculométriques	118
2.3.4. Analyses statistiques	119
2.4. ETUDE COMPLEMENTAIRE : IMPACT D'UN BRUIT D'HELICOPTERE FLUCTUANT	120
2.4.1. Matériel	121
2.4.2. Conditions sonores	122
2.4.3. Tâche TNT.....	123
2.4.4. Tâche de lecture	123
2.4.5. Tâche de vigilance : l'horloge.....	123
2.4.6. Procédure.....	125
3. RESULTATS.....	127
3.1. TACHE 1 DE « TRAVAIL » : TOULOUSE N-BACK TASK.....	129
3.1.1. Résultats subjectifs de la TNT	129
3.1.2. Résultats comportementaux : performances de la TNT...	133
3.1.3. Résultats psychophysologiques de la TNT	135
3.1.4. Résultats des corrélations de la TNT	140
3.1.5. Résumé des résultats de la TNT	141
3.2. TACHE 2 DE LECTURE	141
3.2.1. Résultats subjectifs de la tâche de lecture	141
3.2.2. Résultats comportementaux de la tâche de lecture	146
3.2.3. Résultats psychophysologiques de la tâche de lecture ...	148
3.2.4. Résultats des corrélations de la tâche de lecture	151
3.2.5. Résumé des résultats de la tâche de lecture	152
3.3. TACHE 3 DE REPOS.....	152
3.3.1. Résultats subjectifs de la tâche de repos	153
3.3.2. Résultats psychophysologiques de la tâche de repos	156
3.3.3. Résultats des corrélations de la tâche de repos	159

3.3.4. Résumé des résultats de la tâche de repos.....	160
3.4. RESULTATS COMBINES DES TROIS TACHES.....	160
3.4.1. Résultats subjectifs combinés des trois tâches.....	161
3.4.2. Résultat de l'équation de confort d'Airbus Helicopters....	164
3.4.3. Résumé des résultats combinées des trois tâches	166
3.5. ETUDE COMPLEMENTAIRE : IMPACT D'UN BRUIT D'HELICOPTERE FLUCTUANT	166
3.5.1. Résultats subjectifs	167
3.5.2. Résultats comportementaux.....	170
3.5.3. Résultats des corrélations des tâches	175
3.5.4. Résultats psychophysiologiques	175
3.5.5. Résumé des résultats de l'étude complémentaire.....	177
4. DISCUSSION	179
5. CONCLUSION	189
6. BIBLIOGRAPHIE	193
7. ANNEXES	221

Liste des tableaux

Tableau 1 : Niveaux moyens de bruit interne pour différents types de transport (d'après Macchi, 2015).....	38
Tableau 2 : Statistiques démographiques des participants ayant pris part à une des quatre expériences	91
Tableau 3 : Description résumé des six textes sélectionnés dans le livre « La nuit des Temps » (Barjavel, 1968)	103
Tableau 4 : Items du questionnaire de sensibilité au bruit NSS-SF (Benfield et al., 2014) avec leur traduction en français.....	108
Tableau 5: Items du questionnaire de personnalité EPQR-A (Bouvard et al., 2010)....	110
Tableau 6 : Items du questionnaire d'évaluation de l'état de stress SSSQ (Helton, 2004) avec leur traduction en français.....	112
Tableau 7 : Items du questionnaire d'évaluation subjective des conditions sonores.....	113
Tableau 8 : Items complémentaires au questionnaire d'évaluation subjective des conditions sonores	114
Tableau 9 : Résumé des résultats de l'évaluation subjective des conditions sonores sur la TNT avec la moyenne \pm écart-type. La condition 2 représente le bruit filtré sur toutes les tonalités. HF = hautes-fréquences, BF = basses-fréquences. Les * représentent un test de Wilcoxon significatif avec les conditions en exposant	132
Tableau 10 : Statistiques descriptives de la personnalité du groupe de participants ayant réalisés la tâche 1 'TNT'	141
Tableau 11 : Résumé des résultats de l'évaluation subjective des conditions sonores sur la tâche de lecture avec la moyenne \pm écart-type. Les * représentent un test de Wilcoxon significatif avec les conditions en exposant.....	145
Tableau 12 : Statistiques descriptives de la personnalité du groupe de participants ayant réalisé la tâche 2 de lecture.....	152
Tableau 13 : Résumé des résultats de l'évaluation subjective des conditions sonores sur la tâche de repos avec la moyenne \pm écart-type. La condition 2 représente le bruit filtré sur toutes les tonalités. HF = hautes-fréquences, BF = basses-fréquences. Les * représentent un test de Wilcoxon significatif avec les conditions en exposant.	155
Tableau 14 : Statistiques descriptives de la personnalité du groupe de participants ayant réalisés la tâche 3 de repos	160
Tableau 15 : Résumé des résultats de l'évaluation subjective des conditions sonores sur les trois tâches combinées avec la moyenne \pm écart-type. Les * représentent un test de Wilcoxon significatif avec les conditions en exposant	163
Tableau 16 : Résumé des résultats de l'évaluation subjective des conditions sonores sur les trois tâches de l'expérience complémentaire. Les données dans le tableau représentent la moyenne \pm écart-type. Les # représentent un test de Wilcoxon non significatif avec les conditions en exposant.....	170

Tableau 17 : Statistiques descriptives de la personnalité du groupe de participants ayant réalisés l'étude complémentaire	175
Tableau 18 : Coefficients de corrélations de rang de Spearman pour les résultats comportementaux de la TNT. Les corrélations significatives ($p < 0.05$) sont signalées en rouge.....	224
Tableau 19 : Coefficients de corrélations de rang de Spearman pour les résultats subjectifs de la TNT. Les corrélations significatives ($p < 0.05$) sont signalées en rouge.	225
Tableau 20: Coefficients de corrélations de rang de Spearman pour les résultats comportementaux de la tâche de lecture. Les corrélations significatives ($p < 0.05$) sont signalées en rouge.	228
Tableau 21: Coefficients de corrélations de rang de Spearman pour les résultats subjectifs de la tâche de lecture. Les corrélations significatives ($p < 0.05$) sont signalées en rouge.	229
Tableau 22: Coefficients de corrélations de rang de Spearman pour les résultats subjectifs de la tâche de repos. Les corrélations significatives ($p < 0.05$) sont signalées en rouge.....	232
Tableau 23: Coefficients de corrélations de rang de Spearman pour les résultats comportementaux l'étude complémentaire. Les corrélations significatives ($p < 0.05$) sont signalées en rouge.	235
Tableau 24: Coefficients de corrélations de rang de Spearman pour les résultats subjectifs de l'étude complémentaire. Les corrélations significatives ($p < 0.05$) sont signalées en rouge.	237

Table des figures

Figure 1 : Spectre de bruit pondéré A d'un hélicoptère en vol d'avancement avec les quatre principales sources de bruit.....	39
Figure 2 : Exemple de contrôle actif : deux ondes en opposition de phase avec l'onde résultante.....	40
Figure 3 : Architecture de contrôleurs fonctionnant en boucle ouverte (en haut) et en boucle fermée (en bas).....	41
Figure 4 : Techniques passives et actives complémentaires de réduction du bruit de transmission (d'après Simon et al., 2014).....	42
Figure 5 : Prototype d'appui-tête actif proposé par Olson & May (1953) intégrant un haut-parleur et un microphone derrière la tête du passager.	43
Figure 6 : Prototype d'appui-tête actif développé par Airbus Helicopters (d'après Macchi, 2015).....	45
Figure 7 : Autospectre d'origine (ligne bleue) et autospectre traité (ligne rouge) afin de réduire les composantes tonales. L'émergence est indiquée pour une des raies caractéristiques présente dans ce signal (d'après Macchi, 2015).....	45

Figure 8 : Schéma de l'oreille humaine présentant les parties externe, moyenne et interne	46
Figure 9 : Domaine audible de l'oreille humaine.....	46
Figure 10 : Courbes d'isophonie issue de la norme ISO 226:2003. Les traits pointillés représentent la limite de l'audible.....	48
Figure 11 : Courbes de pondération : A (en bleu), B (en jaune), C (en rouge) et D (en noir). Les traits pointillés représentent une estimation des courbes en hautes fréquences.....	48
Figure 12 : Audiogrammes des pertes auditives types en fonction de l'âge (HL : hearing level)	49
Figure 13 : Illustration de l'encéphale avec les différents lobes du cerveau en vue latérale gauche	64
Figure 14 : Illustration schématique d'un neurone composé d'un corps cellulaire comprenant un noyau et des dendrites, un axone et des terminaisons neuronales	65
Figure 15 : Disposition de dipôles de neurones générant un signal différent au niveau du scalp. (A) La somme des signaux sera négative. (B) Les signaux positifs et négatifs s'annuleront et le signal ne pourra pas être enregistré. (C) L'arrangement aléatoire ne permettra pas de mesurer un signal positif ou négatif. (d'après Jackson & Bolger, 2014).....	65
Figure 16 : Coupe frontale du cerveau présentant les circonvolutions du cortex (d'après Budday, Raybaud, & Kuhl, 2014)	66
Figure 17 : Illustration de dipôles dans différentes orientations par rapport au crâne (d'après M. X. Cohen, 2014).....	66
Figure 18 : Représentation d'un ECG normal composé de l'onde P, du complexe QRS et des ondes T et U	72
Figure 19 : Contribution des métriques psychoacoustiques à l'équation de confort en cabine développée par Airbus Helicopters (d'après Marrot et al., 2011)	75
Figure 20 : Tronçon d'hélicoptère VASCO de l'ONERA Toulouse avec le dispositif expérimental. A gauche est présenté une vue extérieure du tronçon. A droite, une vue intérieure avec le bureau sur lequel les participants réalisaient les expériences.....	82
Figure 21 : Placement des 64 électrodes du BioSemi selon le système international 10-20	83
Figure 22: Placement des deux électrodes externes pour la mesure de l'activité cardiaque. E1 : électrode clavicule droite ; E2 : électrode ligne médio-axillaire gauche.....	84
Figure 23 : Illustration du casque AKG K812 sur son support avec un microphone intégré.....	85
Figure 24 : Support en bois avec microphone intégré	86
Figure 25 : Support en bois avec oreille simulée en pâte avec microphone intégré	86
Figure 26 : Support en mousse avec microphone intégré	86
Figure 27 : Schéma du montage pour le calcul de la fonction de transfert du casque audio.....	86

Figure 28 : Spectre de fréquence des enregistrements microphones des différents supports : en bois, en bois avec une oreille et en mousse	87
Figure 29 : Positions approximatives des microphones dans chaque oreillette du casque	88
Figure 30 : Fonction de transfert des 16 enregistrements réalisés sur chaque oreillette du casque avec différentes positions du microphone. Les tracés en gris représentent les enregistrements sur les 16 positions du microphone (voir Figure 29). Les tracés bleu foncé représentent les moyennes des enregistrements. Les tracés bleu clair représentent l'écart-type des enregistrements.....	89
Figure 31 : Cohérence des 16 enregistrements réalisés sur chaque oreillette du casque avec différentes positions du microphone. Les tracés en gris représentent les enregistrements sur les 16 positions du microphone (voir Figure 29). Les tracés bleu foncé représentent les moyennes des enregistrements. Les tracés bleu clair représentent l'écart-type des enregistrements.....	90
Figure 32 : Schéma du montage d'envoi des signaux des oreillettes gauche et droite au casque audio	90
Figure 33 : Audiogramme moyen de tous les sujets	92
Figure 34 : Spectre fréquentiel du bruit brut sur la bande de fréquence 500-3000 Hz....	93
Figure 35 : Spectre fréquentiel du bruit filtré sur toutes les tonalités.....	94
Figure 36 : Spectre fréquentiel du bruit filtré hautes fréquences.	94
Figure 37 : Spectre fréquentiel du bruit filtré basses fréquences.	95
Figure 38 : Spectre fréquentiel du bruit filtré isophoniquement	96
Figure 39 : Interpolation cubique de la fonction de transfert	97
Figure 40 : Exemple de deux signaux superposés grâce à la méthode du fondu enchaîné	98
Figure 41 : Illustration d'un exemple de séquence d'opérations de la Toulouse N-back Task pour les difficultés 0-back et 2-back. Les opérations en rouge représentent les opérations non-cibles et les vertes les cibles. Les opérations « 00+00 » étaient une condition de repos.....	100
Figure 42 : Photographie d'une participante réalisant la TNT avec un casque EEG sur la tête et le casque audio AKG. Elle réalise la tâche en utilisant le boîtier de réponse Cedrus.	101
Figure 43: Exemple de texte présenté à l'écran lors de la tâche de lecture. Le texte présenté représente la page 4 du texte 1.....	104
Figure 44: Capture d'écran de la vidéo utilisée lors de la tâche de repos. Cette vidéo représente des nuages qui défilent.....	106
Figure 45: Capture d'écran réalisé durant la tâche de repos. On peut voir le cadre noir autour de la vidéo de nuages.	106
Figure 46 : Procédure suivie pour chaque condition sonore à l'exception de la condition silencieuse sans habitude au bruit	115

Figure 47 : Illustration de l'algorithme de détection de pics (findpeaks) sur Matlab. Le tracé bleu représente le signal ECG, le trait pointillé le seuil de détection et les cercle orange les pics N détectés.....	118
Figure 48 : Illustration du calcul des fixations et saccades sur le logiciel Ogama lors de la tâche de lecture.....	119
Figure 49 : Placement des trois électrodes du Faros360.....	121
Figure 50 : Spectre temporel du bruit d'hélicoptère fluctuant utilisé lors de l'étude complémentaire.....	122
Figure 51 : Spectre fréquentiel du bruit d'hélicoptère fluctuant utilisé lors de l'étude complémentaire.....	122
Figure 52 : Analyse temps-fréquence du bruit fluctuant de l'étude complémentaire....	123
Figure 53 : Capture d'écran lors de la réalisation de la tâche de l'horloge.....	124
Figure 54: Procédure suivie pour chaque condition sonore de l'étude complémentaire.....	125
Figure 55: Difficulté subjective de la TNT pour le 0-back (en bleu) et le 2-back (en rouge) en fonction du temps (à gauche) et en fonction des conditions sonores (à droite).....	130
Figure 56: Fatigue subjective à la TNT en fonction du temps (à gauche) et en fonction des conditions sonores (à droite).....	130
Figure 57 : Dimensions du SSSQ en fonction du temps durant la TNT.....	131
Figure 58 : Dimensions du SSSQ en fonction des conditions sonores durant la TNT.....	131
Figure 59 : Graphique représentant les résultats des comparaisons par paires ayant pour but de définir le bruit le plus dérangeant durant la TNT.....	133
Figure 60: Nombre de réponses correctes sur la tâche TNT en fonction du temps (à gauche) et en fonction des conditions sonores (à droite).....	134
Figure 61: Temps de réactions lors de la tâche TNT en fonction du temps (à gauche) et en fonction des conditions sonores (à droite).....	135
Figure 62 : Cartes topographiques de la puissance du rythme thêta en fonction des conditions sonores durant la tâche TNT.....	135
Figure 63 : Puissance du rythme alpha sur la région pariéto-occipitale en fonction du temps durant la tâche TNT.....	136
Figure 64 : Cartes topographiques de la puissance du rythme alpha en fonction des conditions sonores durant la tâche TNT.....	136
Figure 65 : Puissance du rythme gamma sur la région frontale en fonction du temps durant la tâche TNT.....	137
Figure 66 : Cartes topographiques de la puissance du rythme gamma en fonction des conditions sonores durant la tâche TNT.....	137
Figure 67 : Indice de charge cognitive TLI en fonction du temps durant la tâche TNT.....	138

Figure 68 : Indice de charge cognitive TLI en fonction des conditions sonores durant la tâche TNT	138
Figure 69 : Battements par minutes durant la TNT en fonction du temps (à gauche) et en fonction des conditions sonores (à droite)	139
Figure 70 : Rythme cardiaque moyenné sur l'ensemble des conditions bruyantes vs le silence durant la TNT	139
Figure 71 : Indice du NN50 durant la TNT en fonction du temps (à gauche) et en fonction des conditions sonores (à droite)	140
Figure 72 : Indices NN50 moyennés sur l'ensemble des conditions bruyantes vs silence durant la tâche TNT	140
Figure 73 : Difficulté subjective durant la lecture en fonction du temps	142
Figure 74 : Difficulté subjective durant la lecture en fonction des conditions	142
Figure 75: Fatigue subjective à la TNT en fonction du temps (à gauche) et en fonction des conditions sonores (à droite).....	143
Figure 76 : Dimensions du SSSQ en fonction du temps durant la tâche de lecture.....	144
Figure 77 : Dimensions du SSSQ en fonction des conditions sonores durant la tâche de lecture.	144
Figure 78 : Graphique représentant les résultats des comparaisons par paires ayant pour but de définir le bruit le plus dérangentant durant la tâche de lecture	145
Figure 79: Temps de lecture des textes durant la tâche 2 de lecture en fonction du temps (à gauche), en fonction des conditions sonores (au milieu), en fonction des textes (à droite)	146
Figure 80 : Nombre de fixations en fonction du temps (à gauche), en fonction des conditions sonores (au milieu) et en fonction des textes (à droite).....	147
Figure 81 : Durée des saccades en millisecondes en fonction du temps (à gauche), en fonction des conditions sonores (au milieu) et en fonction des textes (à droite)	147
Figure 82 : Nombre de régressions en fonction du temps (à gauche), en fonction des conditions sonores (au milieu) et en fonction des textes (à droite).....	148
Figure 83 : Cartes topographiques de la puissance du rythme thêta en fonction des conditions sonores durant la tâche de lecture	148
Figure 84 : Cartes topographiques de la puissance du rythme alpha en fonction des conditions sonores durant la tâche de lecture	149
Figure 85 : Cartes topographiques de la puissance du rythme gamma en fonction du temps durant la tâche de lecture.....	149
Figure 86 : Cartes topographiques de la puissance du rythme gamma en fonction des conditions sonores durant la tâche de lecture	149
Figure 87 : Battements par minutes durant la tâche de lecture en fonction du temps (à gauche) et en fonction des conditions sonores (à droite)	150
Figure 88 : Rythme cardiaque moyenné sur l'ensemble des conditions bruyantes vs le silence durant la tâche de lecture	151

Figure 89 : Indice du NN50 durant la tâche de lecture en fonction du temps (à gauche) et en fonction des conditions sonores (à droite)	151
Figure 90 : Niveau de fatigue subjective lors de la tâche de repos en fonction du temps	153
Figure 91 : Niveau de fatigue subjective lors de la tâche de repos en fonction des conditions sonores	153
Figure 92 : Dimensions du SSSQ en fonction du temps durant la tâche de repos.....	154
Figure 93 : Dimensions du SSSQ en fonction des conditions sonores durant la tâche de repos.....	154
Figure 94 : Graphique représentant les résultats des comparaisons par paires ayant pour but de définir le bruit le plus dérangeant durant la tâche de repos	156
Figure 95 : Cartes topographiques de la puissance du rythme thêta durant la tâche de repos en fonction des conditions sonores	156
Figure 96 : Cartes topographiques de la puissance du rythme alpha sur la région pariéto-occipitale en fonction du temps durant la tâche de repos.....	157
Figure 97 : Cartes topographiques de la puissance du rythme alpha en fonction des conditions sonores durant la tâche de repos	157
Figure 98 : Cartes topographiques de la puissance du rythme gamma durant la tâche de repos en fonction des conditions sonores	157
Figure 99 : Battements par minutes durant la tâche de repos en fonction du temps (à gauche) et en fonction des conditions sonores (à droite).....	158
Figure 100 : Rythme cardiaque moyenné sur l'ensemble des conditions bruyantes vs le silence durant la tâche de repos.....	159
Figure 101 : Indice du NN50 durant la tâche de repos en fonction du temps (à gauche) et en fonction des conditions sonores (à droite)	159
Figure 102: Fatigue ressentie durant les trois premières expériences (TNT, lecture et repos).....	162
Figure 103 : Graphique représentant les résultats des comparaisons par paires combinés des trois premières expérience ayant pour but de définir le bruit le plus dérangeant	164
Figure 104 : Indice de l'équation de confort des cinq bruits d'hélicoptère	165
Figure 105 : Indice d'acuité	165
Figure 106 : Indice de tonalité	165
Figure 107 : Indice de sonie	166
Figure 108 : Niveau en dB(A).....	166
Figure 109 : Difficulté ressenti au cours du temps durant l'étude complémentaire	167
Figure 110 : Difficulté ressentie en fonction des conditions sonores et des tâches réalisées durant l'étude complémentaire	167
Figure 111 : Fatigue ressenti au cours du temps durant l'étude complémentaire	168

Figure 112 : Fatigue ressentie en fonction des conditions sonores et des tâches réalisées durant l'étude complémentaire	168
Figure 113 : Dimensions du SSSQ en fonction des tâches et des conditions sonores durant l'étude complémentaire.	169
Figure 114 : Nombre de réponses correctes en fonction des conditions sonores durant la tâche TNT de l'étude complémentaire.....	171
Figure 115 : Nombre de réponses incorrectes en fonction des conditions sonores durant la tâche TNT de l'étude complémentaire.....	171
Figure 116 : Temps de réaction en fonction des conditions sonores durant la tâche TNT de l'étude complémentaire.....	172
Figure 117 : Temps de lecture des textes durant la tâche de lecture de l'étude complémentaire en fonction du temps (à gauche), en fonction des conditions sonores (au milieu), en fonction des textes (à droite)	172
Figure 118 : Nombre de sauts détectés en fonction du temps de la tâche de l'horloge durant l'étude complémentaire	173
Figure 119 : Nombre de sauts détectés en fonction des conditions sonores de la tâche de l'horloge durant l'étude complémentaire.....	173
Figure 120: Nombre de sauts détectés moyennés sur les conditions bruyantes vs silence lors de la tâche de l'horloge.....	173
Figure 121 : Nombre de sauts manqués en fonction du temps de la tâche de l'horloge durant l'étude complémentaire	174
Figure 122 : Nombre de sauts manqués en fonction des conditions sonores de la tâche de l'horloge durant l'étude complémentaire	174
Figure 123 : Nombre de sauts manqués moyennés sur les conditions bruyantes vs silence lors de la tâche de l'horloge.....	174
Figure 124 : Rythme cardiaque en fonction des conditions sonores et des tâches durant l'étude complémentaire	176
Figure 125 : Rythme cardiaque moyenné sur l'ensemble des conditions bruyantes vs le silence durant l'étude complémentaire	176
Figure 126 : Indice NN50 en fonction des conditions sonores et des tâches durant l'étude complémentaire	177
Figure 127 : Fonction Matlab permettant d'appliquer un filtre Butterworth aux signaux acoustiques.....	223
Figure 128 : Fonction Matlab permettant d'appliquer un filtre passe-bande elliptique aux signaux acoustiques	223

INTRODUCTION

Le bruit environnemental a des effets bien connus sur l'humain. A court terme, il peut être source de stress, de fatigue, ou de déconcentration (Szalma & Hancock, 2011). Pour autant, la littérature montre que ces effets peuvent être complexes, voire apparaître contradictoires. Ainsi, le bruit peut par exemple être source de stimulation et de motivation lorsque la fatigue est importante (Lundberg & Frankenhaeuser, 1978 ; Szalma & Hancock, 2011). Mais il peut également être source de plaisir lorsque celui-ci est familier ou considéré comme flatteur (bruit de sa propre motocyclette) ou gage de qualité (Parizet, 2006). Dans le domaine de l'acoustique hélicoptère, le bruit ressenti en cabine durant un vol peut être perçu comme pénible en raison des fortes vibrations et des niveaux sonores élevés, émis sur une large gamme de fréquence (10-12000 Hz). Notamment, le bruit de la boîte de transmission principale, située au-dessus de la cabine, est particulièrement désagréable parce qu'il s'agit d'un bruit de type tonal situé dans des gammes de fréquences (entre 500 et 3000 Hz) proches de la parole (200 à 6000 Hz) et auxquelles l'humain est très sensible.

L'exigence en termes de confort acoustique des passagers s'accroît, en particulier dans le cadre de l'utilisation des hélicoptères haut de gamme. Ainsi, un enjeu important pour les constructeurs d'hélicoptère est de continuer à améliorer le confort sonore en cabine sachant que les passagers souhaitent pouvoir travailler, lire, ou se reposer, sans être gênés et sans nécessairement porter une protection auditive.

Pour cela, il existe plusieurs solutions. Un casque de protection peut réduire localement le bruit au niveau des oreilles. Cette solution permet une réduction homogène du bruit, mais elle sera peu efficace sur certaines fréquences (> 1 kHz; Chen, Ghinet, Price, Wickramasinghe, & Grewal, 2017) et peut se révéler inconfortable sur de longues périodes. En effet, il a été reporté que les protections auditives, comme des bouchons d'oreilles, peuvent ne pas être supportées par une partie de la population (Sarafian & Andeol, 2012). Il est également possible de traiter les parois de la cabine pour isoler et amortir le bruit grâce à des matériaux ayant des propriétés de transmission acoustique, comme les panneaux sandwichs (Simon & Puzin, 2000b), présents en tant que structures d'habillage interne, spécialement étudiés pour leurs qualités d'isolation acoustique. Cependant, ces matériaux ne sont efficaces que pour des sons de hautes fréquences (>1000 Hz; Simon et al., 2014). De plus, ces matériaux impliquent une surcharge de l'appareil et donc une consommation de carburant plus importante. Ainsi une dernière solution est d'utiliser des méthodes de réduction actives du bruit via un contrôle actif particulièrement efficace sur le bruit tonal. Le contrôle actif du bruit est une technique visant à réduire les bruits indésirables en superposant une deuxième source sonore à la source originale afin de l'éliminer (Elliott, 2000). Elle peut être une

solution complémentaire aux matériaux amortissants parce qu'efficace sur les moyennes fréquences (Simon et al., 2014), correspondant aux fréquences de la boîte de transmission principale de l'hélicoptère (500-3000 Hz), tandis que les panneaux vibrants sont efficaces sur les hautes fréquences.

Les premières études exploitant ce principe du contrôle actif en cabine d'hélicoptère se sont concentrées sur le contrôle du bruit au niveau des parois, des points de fixation du rotor et de la boîte de transmission principale (Elliott, 2000 ; Keller, 2008 ; Millott, Yoerkie Jr., Welsh, MacMartin, & Davis, 1998 ; Simon & Pauzin, 2000b, 2002). Cependant, l'environnement sonore de la cabine étant trop complexe à maîtriser et à reproduire, la réduction obtenue s'avérait généralement locale et aléatoire. Une solution complémentaire a été d'étudier un concept de contrôle actif local, autour de la tête des passagers. Cette méthode a été évaluée dans le cadre d'une récente thèse en collaboration avec Airbus Helicopters (Marignane, France) et l'ONERA Toulouse (France) par Macchi (2015).

Pour générer un champ de contrôle actif autour de la tête des passagers, Airbus Helicopters a intégré des haut-parleurs et des microphones dans l'appui-tête d'un siège d'hélicoptère. Macchi (2015) a ensuite combiné ce système à un algorithme multi-tonalité permettant de focaliser le filtrage du contrôleur actif uniquement sur les tonalités émergentes (raies) du spectre sonore (correspondant aux fréquences de la boîte de transmission principale) plutôt que sur toutes les fréquences. Ainsi, l'ensemble du système a permis une réduction du niveau sonore allant jusqu'à 4 dB(A) par rapport à un filtrage conventionnel par contrôle actif. Cette réduction représentait une augmentation du confort acoustique estimée jusqu'à 15% d'amélioration (entre 5 et 15% selon le type d'hélicoptère; Macchi, 2015), d'après une équation de confort développée par Airbus Helicopters. Cette dernière permet d'évaluer le confort, qui est un ressenti subjectif, grâce à la prise en compte de mesures subjectives et physiques du son comme la sonie, l'acuité et la tonalité. Cependant, malgré le fait que le bruit ait été subjectivement évalué comme étant moins inconfortable, l'étude de Macchi (2015) n'offrait pas vraiment d'indications concernant les fréquences considérées comme les plus perturbantes, ou stressantes pour les passagers. Egalement, le degré de ces perturbations n'était pas abordé selon différentes activités, par exemple pendant des tâches intellectuelles ou simplement lors du repos. Par ailleurs, il est souhaitable de disposer de mesures directes et plus « objectives » de l'impact du bruit de l'hélicoptère, notamment via l'enregistrement de paramètres psychophysiologiques (ex. le rythme cardiaque).

Comme dit précédemment, les effets du bruit sur le confort et la performance cognitive demeurent complexes à appréhender. Par exemple une étude de Szalma & Hancock (2011) indique que le bruit (à l'exception du bruit de parole) n'a qu'un effet modéré sur les performances obtenues à des tâches cognitives. De plus, il semble

que la performance et la perception subjective du bruit soient liées, c'est-à-dire que l'exécution des tâches peut-être considérablement affectée par la perception du bruit (Bowden & Wang, 2004 ; Bowden, 2006). Ainsi une étude (Ryherd & Wang, 2008) a montré que le lien entre bruit et performance cognitive était relatif et dépendait des individus : plus un son est ressenti comme distrayant, gênant, grave et fluctuant, plus la performance lors d'une tâche d'écriture semble diminuer. Ryherd & Wang (2007, 2008) ont analysé l'effet du bruit de ventilation, qui est un bruit tonal, sur la perception et les performances lors de tâches d'écriture, de raisonnement et de mathématique. Ils ont ainsi montré que ce bruit tonal n'avait pas d'impact par rapport à un bruit large bande sur les performances aux trois tâches alors que la perception subjective du bruit était affectée par les tonalités. De façon générale, cette étude a montré que le bruit tonal était perçu comme plus dérangent et agaçant qu'un simple bruit large bande.

D'autre part, il n'est pas forcément pertinent de supprimer toutes les sources de bruit. Ainsi, des études (Landström, Kjellberg, Söderberg, & Nordström, 1991 ; Wasserman & Segool, 2013) indiquent que l'ajout d'un bruit rose (qui est un signal aléatoire dont la densité spectrale décroît de manière logarithmique) sur un bruit diminuait la gêne ressentie et augmentait les performances et la vigilance. Bien entendu, les études psychoacoustiques classiques n'apportent pas toutes les réponses à la problématique du bruit d'hélicoptère. Les bruits utilisés sont souvent de natures très différentes : bruits de ventilation (se rapprochant d'un bruit blanc de 10 à 8000 Hz.) vs bruits de moteur ou de rotors. De plus, les niveaux sonores sont fréquemment plus faibles : 50 dB(A) pour Landström et al. (1991) vs 75 à 120 dB(A) en cabine d'hélicoptère (Chen et al., 2017 ; Coy et al., 1987 ; Marrot, Caillet, Roulois, & Crozat, 2011 ; Murray & Wilby, 1978).

Afin d'atteindre une compréhension plus fine de l'effet du bruit sur l'homme, certaines études ont tenté d'évaluer l'impact du bruit sur l'activité cérébrale et cardiaque. Makeig (1993) a réalisé une étude sur l'exposition répétée et fréquente (toutes les 5 s) de différentes tonalités intermittentes durant plusieurs jours. Il a montré qu'une diminution de l'amplitude dans la bande thêta (4-8 Hz) et alpha (8-13 Hz) avaient été observées sur des enregistrements électroencéphalographiques (EEG). Il a également été montré qu'une exposition courte à un bruit fort (95 dB(A)) avait un impact sur l'activité physiologique de sujets sains, avec une augmentation de la tension artérielle (Andrén, 1982). Ceci expliquerait les effets du bruit sur l'activité cardiaque. En effet, la fréquence cardiaque peut être impactée par une exposition au bruit (Belojević, Jakovljevic, Stojanov, Paunovic, & Ilic, 2008 ; Lusk, Gillespie, Hagerty, & Ziemba, 2004). De plus, l'activité EEG et ECG sont de bons indicateurs de la charge cognitive (Klimesch, 1999 ; Thayer, Hansen, Saus-Rose, &

Johnsen, 2009), permettant d'obtenir une mesure objective de l'état mental des participants lors de tâches cognitives.

Pour résumer, le contrôle actif est une solution complémentaire aux matériaux amortissants ou à fort affaiblissement acoustique pour réduire le bruit en cabine d'hélicoptère. Il est également préférable de réaliser le contrôle actif au voisinage de la tête des passagers plutôt que sur les parois car les nombreuses sources de bruit dans une cabine d'hélicoptère rendent inadéquates les procédures de contrôles actifs distribués spatialement. De plus, le contrôle actif associé à un algorithme multi-tonalité permet une réduction significative du bruit de cabine d'hélicoptère qui devient aussi plus confortable. Toutefois, il est à noter que les précédents auteurs se sont concentrés uniquement sur le ressenti subjectif pour évaluer l'impact du bruit sur les passagers ainsi que le confort. Ainsi, utiliser des mesures objectives comme l'activité cérébrale et cardiaque permet de mieux évaluer l'effet du bruit sur les passagers en fonction de l'activité cognitive qu'ils sont en train de réaliser.

L'objectif de cette thèse est de définir s'il est pertinent de filtrer toutes ces tonalités en fonction de la tâche qu'est en train de réaliser le passager. Autrement dit, cette thèse vise à mieux cerner l'impact de différents bruits de cabine d'hélicoptère sur les performances cognitives et le confort des passagers, grâce à des mesures subjectives, comportementales et psychophysiologiques (électroencéphalographie et électrocardiographie).

Dans ce manuscrit, nous proposons un état des lieux des connaissances dans le domaine de la psychoacoustique et une évaluation holistique de l'impact du bruit par l'utilisation de mesures subjectives, comportementales et psychophysiologiques. Nous présentons ensuite les trois expérimentations menées principalement dans le tronçon d'hélicoptère « VASCO » de l'ONERA. L'enjeu de ces expérimentations était de mieux caractériser l'impact de différents profils de bruits d'hélicoptères dans le but d'établir des recommandations de développement de lois de contrôle actif. Afin de simuler l'activité d'un passager, trois tâches ont été sélectionnées : une tâche de « travail cognitif » combinant calcul mental, raisonnement et mémoire de travail, une tâche de lecture et enfin une tâche de repos. De plus, une étude complémentaire a été réalisée dans le but d'évaluer l'impact d'un bruit d'hélicoptère fluctuant (plusieurs décollages et atterrissages) sur les mêmes tâches de « travail » et de lecture. La tâche de repos a été écartée pour cette quatrième étude laissant la place à une tâche de vigilance. Nos résultats subjectifs, comportementaux et psychophysiologiques ont été mis en regard avec ceux obtenus par Macchi (2015) avec l'échelle de confort acoustique d'Airbus Helicopters. Nos résultats font apparaître qu'une exposition modérée (durée courte) aux sons d'hélicoptères n'a pas d'effet net sur les performances cognitives et n'a créé qu'une faible augmentation

du niveau de stress, tel qu'observé via l'augmentation du rythme cardiaque en présence des bruits (tous confondus) vs le silence. Nous avons également retrouvé une bonne correspondance entre l'échelle de confort acoustique d'Airbus Helicopters et nos résultats.

Ce manuscrit est composé de cinq chapitres. Le premier chapitre présentera le contexte théorique et scientifique du sujet. Le deuxième chapitre exposera la méthodologie qui a été suivie pour les quatre expérimentations qui ont eu lieu durant cette thèse. Le troisième chapitre présentera les résultats de ces expériences. Une discussion autour des résultats obtenus se tiendra dans le chapitre 4. Et finalement, le chapitre cinq proposera les conclusions et perspectives de ce travail de thèse.

1.
CONTEXTE THEORIQUE ET
SCIENTIFIQUE

1.1. LE BRUIT D'HELICOPTERE

1.1.1. Définition du bruit

Le son est une sensation auditive engendrée par une onde acoustique, cette dernière résultant de la vibration des particules fluides du milieu ambiant (l'air, l'eau, etc.). Ces vibrations peuvent être produites de différentes manières : par des chocs (tambour), des frottements (violon), ou encore des poussées d'air (instrument à vents, voix humaine). Le bruit possède une définition plus subjective parce qu'il représente toute sensation auditive désagréable ou gênante (d'après le vocabulaire d'acoustique du Comité Electrotechnique français, Lamoral & Matras, 1967). Ainsi un son agréable pour quelqu'un, pourra être perçu comme désagréable par quelqu'un d'autre et être défini comme un bruit par cette dernière personne. Une autre façon plus générale de définir un bruit est de le restreindre à la définition d'un son non désiré.

1.1.2. Composition du bruit interne d'hélicoptère

Depuis les deux dernières décennies, le bruit présent dans l'habitacle des moyens de transports est devenu une préoccupation grandissante pour les constructeurs aéronautiques. C'est d'autant plus vrai pour l'hélicoptère, qui est le moyen de transport le plus bruyant (Tableau 1) mais présentant en même temps une clientèle ayant un niveau élevé d'exigence. Le confort acoustique représente aujourd'hui un critère de qualité important pour les clients, en particulier pour les versions *VIP* d'hélicoptère, ciblant le transport d'affaires et de personnalités. Ainsi, les industriels sont de plus en plus sollicités par les clients pour améliorer le confort acoustique. Ces derniers sont désireux de pouvoir se livrer à des activités diverses et en tout confort : lire, travailler ou simplement se reposer.

Tableau 1 : Niveaux moyens de bruit interne pour différents types de transport (d'après Macchi, 2015)

Type de véhicule	Niveau en dB(SPL)	Niveau en dB(A)
Hélicoptère	110	90
Avion à hélice	100	90
Hélicoptère version <i>VIP</i>	110	85
Avion à réaction	90	75
Voiture à 130 km/h	100	70
Train	95	60

L'environnement acoustique de la cabine d'hélicoptère se compose de quatre sources principales de bruit (Figure 1) :

- Le bruit de la boîte de transmission principale, de type tonal. Cela correspond à un bruit dominé par plusieurs tonalités nettement distinctes. En raison de la présence de nombreux engrenages, la boîte de transmission génère une dizaine de raies émergentes du spectre (Figure 1) dans la gamme de fréquence allant de 500 à 5000 Hz, avec un maximum entre 1000 et 3000 Hz.
- Le bruit aérodynamique qui est créé par l'avancement de l'appareil dans l'air créant une excitation aérodynamique sur le fuselage produisant un bruit large bande dont l'énergie décroît en fonction des fréquences.
- Le bruit du rotor principal, bruit à basses fréquences, dû en partie à la fréquence de passage des pales.
- Le bruit des moteurs engendré par les turbines produisant un bruit à hautes fréquences autour de 10 kHz.

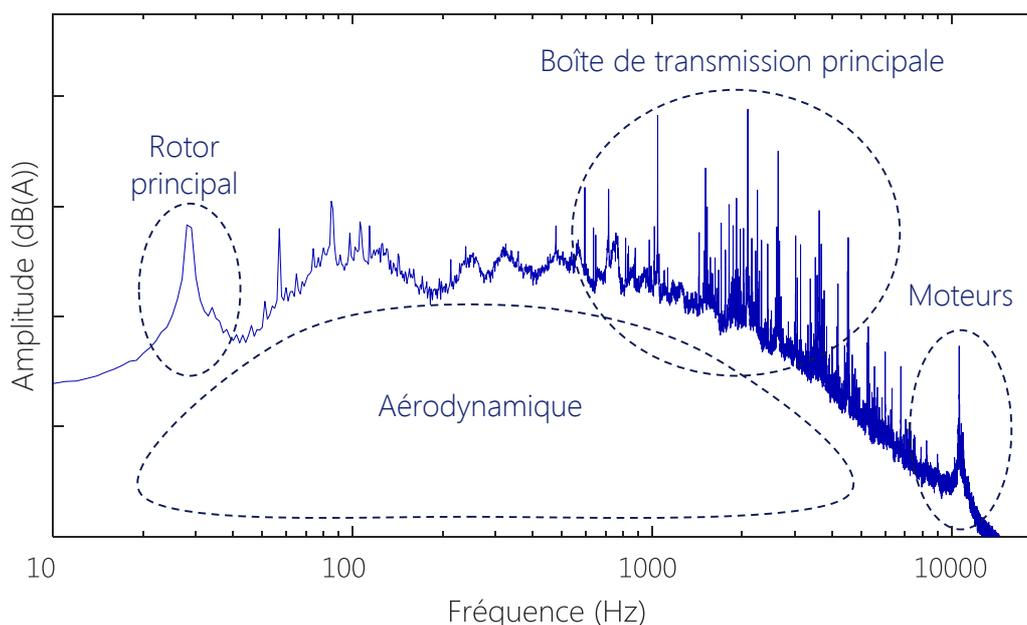


Figure 1 : Spectre de bruit pondéré A d'un hélicoptère en vol d'avancement avec les quatre principales sources de bruit

Selon le type de machine, le niveau global de bruit à l'intérieur de la cabine peut aller de 75 à 120 dB(A) (Chen et al., 2017 ; Clevenson, Leatherwood, & Hollenbaugh, 1983 ; Coy et al., 1987 ; Marrot et al., 2011 ; Murray & Wilby, 1978). En effet, le bruit augmente en fonction de la puissance et de la taille de l'hélicoptère (Coy et al., 1987 ; Weden & Coy, 1984). Néanmoins, les hélicoptères civils sont soumis à des critères maximums de bruit interne compris entre 80 et 85 dB(A) en vol stabilisé et 87 dB(A) en vol transitoire, suivant la norme 2003/10/CE (Simon et al., 2014). A noter que le bruit tonal de la boîte de transmission est souvent de 10 à 20 dB plus élevé que le bruit large bande (Bebesel, Maier, & Hoffmann, 2001 ; Maier, Hoffmann, Tewes, & Bebesel, 2002 ; Marrot et al., 2011 ; O'Connell, Mathur, JanakiRam, Johnson, & Rossetti, 2001). Depuis les années 50 et jusqu'aux années 80, le bruit de la boîte de transmission est devenu progressivement de plus en plus bruyant, augmentant de 6 dB par décennie (Weden & Coy, 1984). Cela vient du fait que, dans le passé, l'un des principaux objectifs était de réduire le poids de la boîte de transmission, mais à mesure que le poids diminuait, le bruit augmentait (Weden & Coy, 1984).

De ce fait, afin de réduire les niveaux d'exposition au bruit et d'améliorer les communications, l'équipage d'un hélicoptère doit porter un casque tout au long des missions aériennes. Pourtant, le casque n'apporte pas de réduction suffisante sur certaines fréquences (> 1 kHz ; Chen et al., 2017). Les niveaux de bruit élevés dans la cabine peuvent alors nuire aux communications, réduire le confort de l'équipage à court terme et entraîner une perte auditive à long terme. Pour les passagers,

l'exposition est bien entendu moins fréquente et ses effets concerneront davantage le confort que les risques pour l'acuité auditive. Comme nous l'avons vu en introduction de ce manuscrit, le problème de la réduction du bruit peut être abordé de manière passive ou active.

1.1.3. Réduction passive

Les principaux moyens de contrôle de l'acoustique de la cabine sont les systèmes passifs. La réduction passive du bruit se caractérise par une absence d'apport énergétique. La réduction est effectuée grâce à la conception de matériaux aux propriétés isolantes, absorbantes et amortissantes, adaptées au niveau désiré de limitation du bruit. Néanmoins, ces traitements possèdent des limites en termes de coût, d'espace et de poids qui amènent à alourdir l'appareil (Weden & Coy, 1984). Ces matériaux sont généralement composés de plusieurs couches dont l'ensemble est appelé « panneau sandwich ». Les structures classiques, comportant une âme centrale en nid d'abeille, ont un comportement piloté essentiellement par la masse, ceci dans la bande de fréquence d'intérêt. Il est néanmoins possible de proposer des concepts permettant d'augmenter l'indice d'affaiblissement tout en conservant un encombrement et une masse réduite (Eurocopter, 2010 ; Simon, Pauzin, & Biron, 2004).

1.1.4. Réduction active

1.1.4.1. Définition du contrôle actif

Le contrôle actif a pour objectif la réduction d'un bruit indésirable par l'apport d'une énergie supplémentaire, c'est-à-dire en créant un contre-bruit à l'aide d'une source de bruit secondaire. Pour que le contrôle soit efficace, il faut générer le contre-bruit en opposition de phase avec la source primaire (Figure 2).

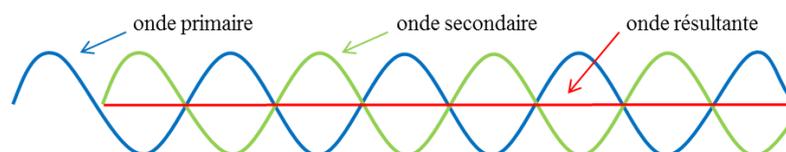


Figure 2 : Exemple de contrôle actif : deux ondes en opposition de phase avec l'onde résultante

Le contrôle actif est réalisé grâce à des capteurs (microphones, accéléromètres, etc.) et des actionneurs (haut-parleurs, piézoélectriques, etc.) pour recueillir simultanément l'information et générer le contre-bruit grâce au contrôleur. Deux types de capteurs peuvent être utilisés : les capteurs de référence, qui servent à donner au contrôleur le signal primaire nécessaire à la création du signal secondaire (corrélé avec le bruit primaire) et les capteurs d'erreurs, qui permettent de donner au contrôleur l'erreur de sortie qu'il devra minimiser. Le contrôleur utilise les informations des capteurs d'erreurs et de référence pour générer un signal envoyé aux actionneurs afin de créer le champ secondaire. Le champ secondaire s'ajoute au champ primaire pour créer le champ résiduel (Figure 2).

Deux types de contrôle peuvent être appliqués : un contrôle en boucle ouverte ou un contrôle en boucle fermée (Figure 3). Seul le deuxième type de contrôle peut tenir compte d'une instationnarité temporelle du bruit primaire.

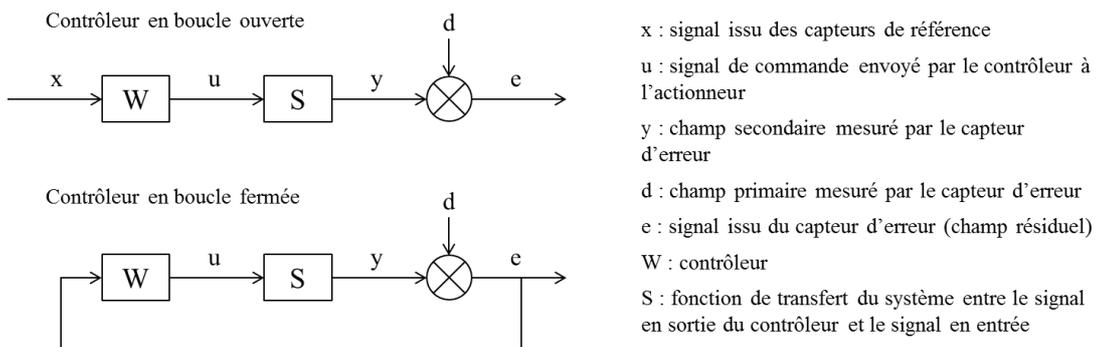


Figure 3 : Architecture de contrôleurs fonctionnant en boucle ouverte (en haut) et en boucle fermée (en bas)

Le contrôle actif possède certaines limites liées à la difficulté d'obtenir des algorithmes de réduction de bruit robuste en cas d'instabilité temporelle des signaux acoustiques et en particulier dans le cas d'une variation des amplitudes de pression. Un glissement des fréquences est, en revanche, parfaitement maîtrisable. De plus, pour assurer une réduction active du bruit efficace sur les basses fréquences (< 500 Hz), le contrôleur nécessite des actionneurs plus imposants et donc plus lourd, qui ne sont pas compatibles avec les contraintes d'avionabilité. En effet, la zone de réduction de bruit procurée par un actionneur localisé, tel qu'un haut-parleur, sera d'autant plus réduite que la fréquence sera élevée ou que la longueur d'onde sera faible (Joseph, Elliott, & Nelson, 1994). Au-delà de 200 Hz, si on fait l'hypothèse d'un rayonnement de type piston plan procuré par un haut-parleur, la réduction de pression, hors champ proche du haut-parleur, sera inférieure à 10 dB (zone de silence) à une distance supérieure à 17 cm. A 1000 Hz, cette zone se restreint à 3,5 cm.

1.1.4.2. Réduction active du bruit en cabine d'hélicoptère

La réduction active du bruit en cabine d'hélicoptère se révèle complémentaire aux solutions passives. En effet, comme le montre la Figure 4, les structures passives sont principalement efficaces sur les hautes fréquences, alors que les techniques de contrôle actif du bruit seront efficaces généralement sur les basses fréquences.

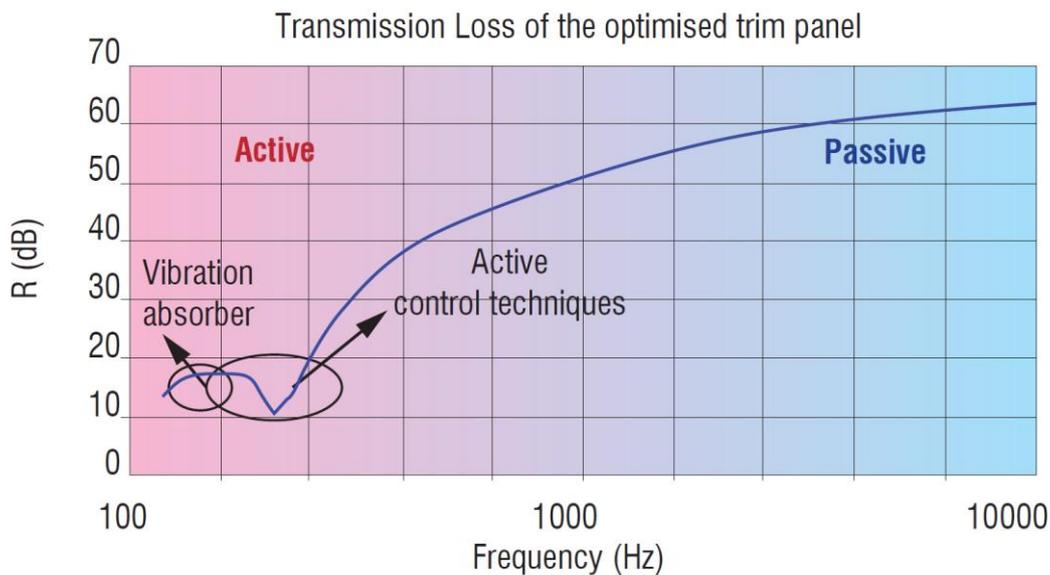


Figure 4 : Techniques passives et actives complémentaires de réduction du bruit de transmission (d'après Simon et al., 2014)

De nombreuses études réalisées en cabine d'hélicoptère ont exploité le principe du contrôle actif dans l'optique de réduire le niveau acoustique dans l'habitacle. Deux types de contrôle peuvent être réalisés : un contrôle vibratoire de la structure de l'appareil et un contrôle acoustique aérien.

Dans le domaine du contrôle vibratoire, des recherches ont été réalisées sur les panneaux d'habillage du plafond de la cabine à l'aide d'actionneurs piézoélectriques (Le Bihan, 2000, 2002 ; Menelle & Baroin, 2001 ; O'Connell et al., 2001 ; Simon & Biron, 2002 ; Simon & Puzin, 2002). Les réductions se sont avérées efficaces sur les vibrations mais insuffisantes pour être significatives sur les mesures réalisées par les microphones placés au niveau de la tête des passagers. La raison de ce manque d'efficacité est notamment liée aux trop nombreuses fuites acoustiques autour du panneau contrôlé. D'autres études se sont concentrées sur le contrôle vibratoire du plancher mécanique (c'est-à-dire le plancher sous la boîte de transmission principale) à l'aide d'actionneurs piézoélectriques et inertiels (Le Bihan, 1998 ; Le Bihan & Petitjean, 2000 ; Simon & Puzin, 2000a, 2000b), mais là aussi la

réduction s'est révélée non significative. Une autre méthode employée consistait à contrôler les vibrations des barres de fixations de la boîte de transmission principale grâce à des actionneurs piézoélectriques inertiels, ceci dans le but de réduire le bruit des engrenages (Cariou & Martin, 1996 ; Dussac & Ducros, 1998 ; Dussac, Dupont, & Djelassi, 1998 ; Mahapatra, Gopalakrishnan, & Balachandran, 2001 ; Millott et al., 1998 ; Simon & Puzin, 1999 ; Sutton, Elliott, Brennan, Heron, & Jessop, 1997). Néanmoins, malgré une importante réduction de l'amplitude des raies pouvant aller jusqu'à 40 dB (Sutton et al., 1997), la réduction globale du bruit n'était pas satisfaisante dans la cabine.

Le contrôle acoustique aérien s'est concentré sur la réduction des raies émergentes large bande qui se trouvent dans la zone autour de la tête des passagers (Albarazin, Lucet, & Delinière, 2000 ; Dussac & Cremesi, 2001b, 2001a), ceci grâce à des haut-parleurs placés dans la cabine. Le contrôle acoustique aérien a également été appliqué aux raies de la boîte de transmission principale (Dussac et al., 1998) ou des rotors (Boucher, Elliott, & Baek, 1996). Afin de diminuer la complexité du problème, une autre solution de contrôle aérien consiste en une approche plus locale. L'idée est de réaliser le contrôle uniquement sur une zone beaucoup plus restreinte que les solutions précédentes, autour de la tête des passagers. Pour cela, des prototypes d'appui-tête actif (Figure 5) ont été développés intégrant des haut-parleurs et des microphones (Olson & May, 1953). Néanmoins, cette réduction locale a été principalement utilisée sur des bruits périodiques à basses fréquences (jusqu'à 200 Hz) car la taille de la zone n'est pas suffisamment grande pour un contrôle efficace des hautes fréquences.

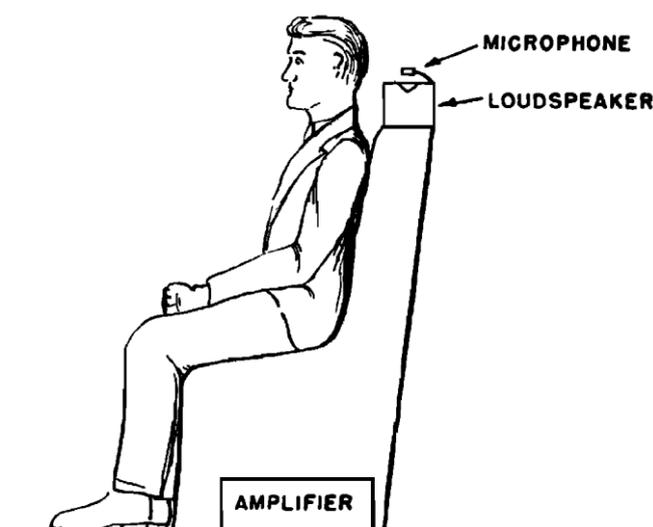


Figure 5 : Prototype d'appui-tête actif proposé par Olson & May (1953) intégrant un haut-parleur et un microphone derrière la tête du passager.

1.1.4.3. Appui-tête actif Airbus Helicopters

Macchi (2015) a montré que l'amélioration du confort sonore en cabine d'hélicoptère était largement conditionné par la réduction du bruit de boîte de transmission et du bruit aérodynamique, dont les fréquences sont comprises dans le domaine d'action du contrôle actif. L'objectif de la thèse de Macchi (2015) a été dans un premier temps d'analyser les avantages et inconvénients d'une solution par appui-tête actif. La limitation principale du contrôle local était physique, en raison de la variabilité des champs de pression de la zone sur laquelle l'atténuation est obtenue. Par ailleurs, afin d'obtenir une réduction « audible » par le passager, la signature acoustique de l'hélicoptère nécessitait de mettre en œuvre des algorithmes temps-réel spécifiques aux deux types de bruits cités ci-dessus. Enfin, des contraintes d'intégration propres à un produit embarqué étaient imposées telles que le volume ou la masse réduite des composants. Ainsi, la génération de zones de silence de taille pratique, couvrant le déplacement de la tête d'un passager sur une zone suffisamment étendue, a été réalisée par l'utilisation combinée de capteurs/actionneurs et d'une information sur la position des oreilles. Un algorithme dédié au contrôle du bruit de boîte de transmission et intégrant cette information de position a été spécifiquement développé pour cette utilisation : l'algorithme IMC-VSS-Weighted-Multi-Tone. Ce dernier fait l'hypothèse que le bruit d'hélicoptère est composé de raies dans des bandes de fréquences données. De la sorte, le calcul est simplifié en se focalisant uniquement sur ces raies. Une fois implémenté sur le prototype d'appui-tête actif (Figure 6), des mesures de performance de l'algorithme ont été réalisées à l'aide d'un mannequin acoustique. Les résultats montrent que l'algorithme permet des gains bien supérieurs à un algorithme classique de type FxLMS sur les microphones d'erreur (FxLMS : algorithme LMS sur lequel les références sont filtrées grâce à une estimation de la fonction de transfert ; Figure 7). Grâce à cet algorithme, l'efficacité du système a pu être poussée en plus haute fréquence, jusqu'à 3000 Hz. Les zones de silence obtenues lors des essais de contrôle couvrent le déplacement de la tête du passager sur une zone de 5 cm en latéral et 10 cm en profondeur. Des gains pouvant aller jusqu'à 4 dB(A) étaient obtenus sur certains enregistrement de bruit interne.



Figure 6 : Prototype d'appui-tête actif développé par Airbus Helicopters (d'après Macchi, 2015)

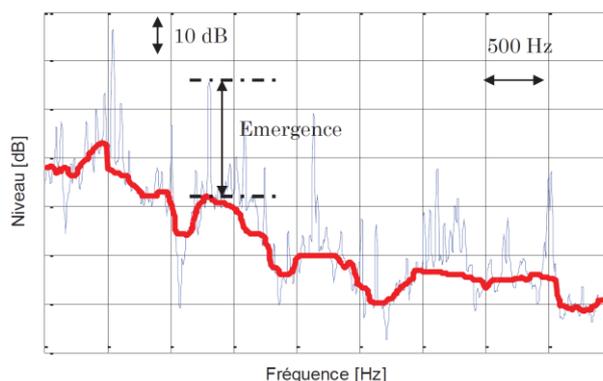


Figure 7 : Autospectre d'origine (ligne bleue) et autospectre traité (ligne rouge) afin de réduire les composantes tonales. L'émergence est indiquée pour une des raies caractéristiques présente dans ce signal (d'après Macchi, 2015)

1.2. PRESENTATION DU SYSTEME AUDITIF HUMAIN

1.2.1. Anatomie de l'oreille humaine

Afin de mieux cerner l'impact du bruit d'hélicoptère sur l'homme, il convient de rappeler quelques caractéristiques physiologiques du système auditif humain.

L'oreille est composée de trois parties : l'oreille externe, l'oreille moyenne et l'oreille interne.

L'oreille externe comprend le pavillon et le conduit auditif externe, qui aboutit au tympan (Figure 8). Elle permet de capter et d'amplifier les sons : à 3000 Hz, l'oreille externe peut amplifier jusqu'à 23 décibels (dB). Le pavillon de l'oreille nous permet de capter les sons et d'en distinguer l'orientation. Il joue le rôle d'un entonnoir qui dirigerait les sons vers le conduit auditif. L'écoute binaurale se révèle être primordiale pour évaluer la localisation des sources sonores. Pour simplifier, le déphasage de l'onde entre les deux oreilles dû à notre tête qui représente un obstacle, ainsi que la différence d'intensité sonore leur parvenant, permettent de déterminer d'où provient la source sonore sur un plan horizontal.

L'oreille moyenne est constituée du tympan et des osselets (soit le marteau, l'enclume et l'étrier ; Figure 8). Elle a pour rôle d'adapter l'impédance entre le milieu aérien et le milieu liquide de l'oreille. En effet, la surface du tympan est environ 20 fois plus grande que la surface qui reçoit le signal dans l'oreille interne (fenêtre ovale

de la cochlée). C'est pourquoi le signal est amplifié une fois de plus afin de pouvoir transmettre les vibrations. Cette amplification est estimée à environ 30 dB à 1500 Hz. La trompe d'Eustache se trouve au niveau de l'oreille moyenne. Elle a pour rôle de modifier la pression afin que celle-ci soit comparable des deux côtés du tympan, ceci permettant d'éviter sa rupture (Figure 8).

L'oreille interne est composée de la cochlée et des voies nerveuses auditives. Elle permet une transduction mécano-électrique ainsi qu'un codage fréquentiel. La cochlée abrite l'organe de Corti, contenant du liquide (périmpmphe) et les cellules ciliées. Les cellules ciliées se contractent à l'arrivée d'une vibration et vont transformer cette information mécanique en signal nerveux électrique, qui sera transmis au cerveau par le nerf auditif. Au niveau de la cochlée et jusqu'au cortex auditif primaire, une tonotopie de l'information auditive est réalisée, c'est-à-dire que les fréquences sont représentées de manière ordonnées (S. D. Costa et al., 2011 ; Romani, Williamson, & Kaufman, 1982). Par exemple, à la base de la cochlée se trouvent les cellules sensibles aux hautes fréquences, alors que les cellules sensibles aux basses fréquences sont à l'apex. Le message électrique envoyé par la cochlée passe par plusieurs relais, notamment par le bulbe rachidien, pour ensuite arriver aux aires auditives primaires. Cette étape permet de décoder l'information en sensation ou perception. En retour, le cerveau pourra contrôler le fonctionnement de la cochlée qui pourra se focaliser sur des informations prioritaires, par exemple, une conversation suivie dans un environnement bruyant (Howard & Angus, 2017).

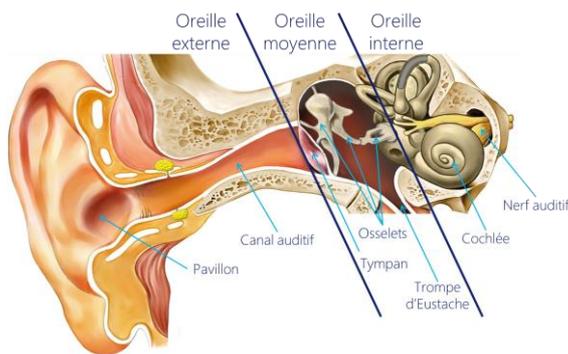


Figure 8 : Schéma de l'oreille humaine présentant les parties externe, moyenne et interne

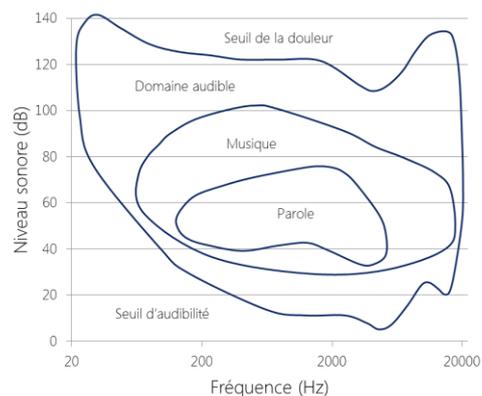


Figure 9 : Domaine audible de l'oreille humaine

1.2.2. Particularités de l'audition

L'oreille humaine a des capacités limitées en fréquence et en intensité, elle n'est sensible qu'aux sons entre 20 Hz et 20 kHz (Figure 9). La sensibilité de l'oreille est supérieure entre 1000 et 5000 Hz (Fletcher & Munson, 1933) en raison de la résonance du canal auditif et de la fonction de transfert des osselets. La perception du son par l'homme varie de manière logarithmique. Pour cette raison, les niveaux de pression sont évalués grâce aux décibels, qui représentent une échelle logarithmique de mesure de l'intensité par rapport à la pression acoustique. Le résultat du calcul de l'intensité sonore se note en dB(SPL) pour *Sound Pressure Level* en anglais.

$$L_{dB(SPL)} = 20 \log_{10} \frac{p}{p_0} \quad (1)$$

Il s'agit du calcul du niveau sonore L en dB(SPL) avec p la valeur de la pression instantanée et p_0 la pression atmosphérique ($p_0 = 2.10^{-5}$ Pa).

Cependant, les décibels ne vont pas traduire la sensation réelle de l'oreille en raison du traitement différent en fonction des fréquences (Fletcher & Munson, 1933). En effet, selon la fréquence du son et à intensité égale, le volume sonore ne sera pas perçu équivalent. Pour pallier ce problème, des courbes d'isotonie ont été créées. Elles permettent de définir les phones qui correspondent à une même sensation auditive mais à des niveaux de bruit différents (Figure 10). Ainsi un son à 20 Hz et 90 dB sera entendu de la même façon (i.e. au même niveau sonore) qu'un son à 1000 Hz à 40 dB. Pour prendre en compte la sensation perçue et non pas le niveau de pression sonore (dB), les instruments de mesures sont équipés de filtres atténuant ou augmentant l'intensité des basses, moyennes ou hautes fréquences. Ces filtres sont obtenus en appliquant des courbes de pondération se basant sur les courbes d'isotonie. Ainsi selon la norme ISO 226:2003, la pondération A, qui est la plus utilisée (notée dB(A)), se base sur la courbe correspondant au phone 40 (courbe étant égale à 40 dB à 1000 Hz ; Figure 11). De la même façon, la pondération B est obtenue à partir du phone 70, la pondération C à partir du phone 90 (Figure 11). La pondération D a été créée pour des niveaux de bruit exceptionnellement élevés et est particulièrement bien adaptée pour les bruits des avions par exemple (Figure 11).

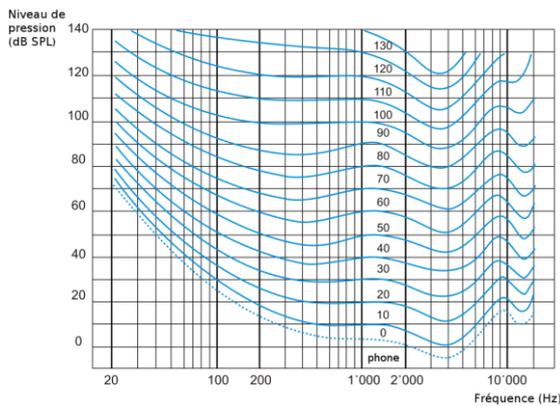


Figure 10 : Courbes d'isophonie issue de la norme ISO 226:2003. Les traits pointillés représentent la limite de l'audible.

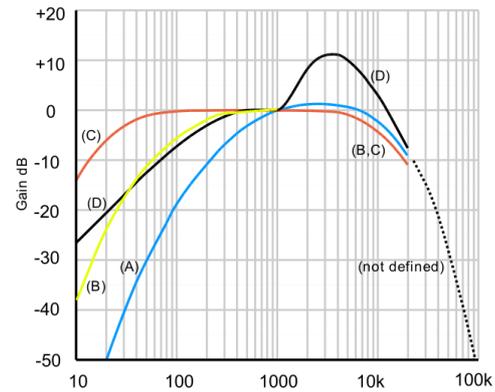


Figure 11 : Courbes de pondération : A (en bleu), B (en jaune), C (en rouge) et D (en noir). Les traits pointillés représentent une estimation des courbes en hautes fréquences.

L'exposition au bruit n'est pas sans danger, les niveaux ainsi que la durée d'exposition sont réglementés pour éviter les dégâts irréversibles sur l'oreille. Le réflexe stapédien a pour but de minimiser les dégâts sur l'oreille à partir de niveaux sonores élevés (à partir de 80 dB pour des fréquences entre 250 et 4000Hz; Dancer, 1991). Ce phénomène se produit grâce à la contraction de muscles de l'oreille moyenne rendant la chaîne des osselets plus rigide afin d'atténuer le son (Møller, 1962). D'après la réglementation, le code du travail français impose une exposition de 8 heures maximum par jour pour un niveau de 80 dB(A) et de deux heures pour un niveau de 86 dB(A). Pour évaluer les capacités auditives d'une personne, on a recours à un audiogramme, qui établit le seuil d'audibilité grâce à des sons purs (8 et 11 fréquences sont testées : 125, 250, 500, 750, 1000, 1500, 2000, 3000, 4000, 6000, 8000 Hz). L'objectif est d'établir le niveau de perte auditive en fonction des fréquences. Les pertes sont considérées comme légères lorsqu'elles ne dépassent pas 25 dB HL (pour *Hearing Level*) et sévères au-delà de 70 dB HL. Le terme de surdité est utilisé pour une perte de plus de 90 dB. On remarque un effet de l'âge sur les audiogrammes, avec une baisse du seuil de perception des hautes fréquences et sur les sons de faibles intensités (Figure 12). Ce phénomène appelé presbycusis, se traduit par une perte progressive de l'audition en fonction de l'âge (Huang & Tang, 2010). La presbycusis est principalement due à des dégénérescences des cellules sensorielles.

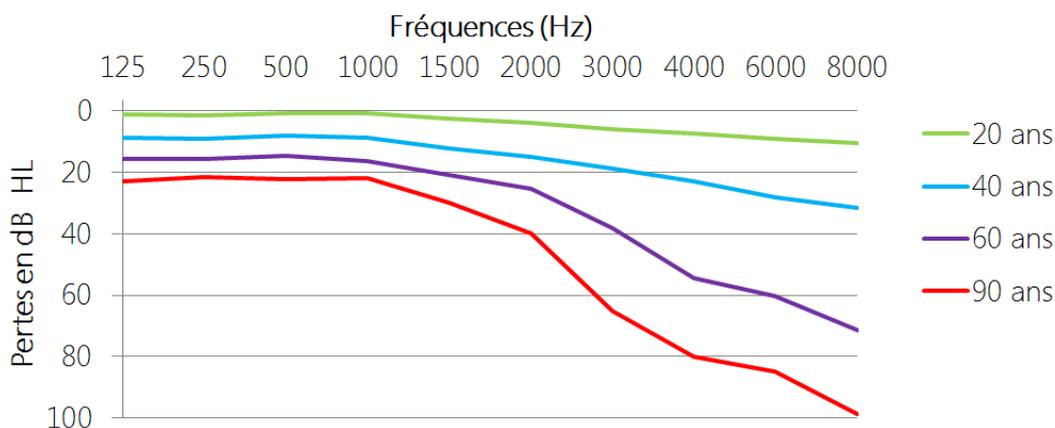


Figure 12 : Audiogrammes des pertes auditives types en fonction de l'âge (HL : hearing level)

Cependant, certains déficits auditifs peuvent ne pas être détectés sur un audiogramme. C'est le cas de la synaptopathie cochléaire qui est due à une dégénérescence des synapses et terminaisons nerveuses cochléaires et qui peut générer des problèmes de compréhension de la parole dans des environnements bruyants (Liberman, Epstein, Cleveland, Wang, & Maison, 2016). Cette affection peut être détectée par émission otoacoustique et électrocochléographie.

1.3. L'APPORT DE LA PSYCHOACOUSTIQUE

La psychoacoustique est l'étude des rapports entre la perception auditive et les sons qui parviennent à l'oreille humaine. Elle a pour but de réaliser des corrélations entre le domaine perceptif et le domaine physique. Les méthodes utilisées en psychoacoustique se basent sur celles de la psychologie expérimentale, qui cherche à définir la relation entre un stimulus (dans ce cas, les propriétés physique du son) et une réponse comportementale chez le sujet. La psychoacoustique va chercher à évaluer l'expérience qu'une personne a d'un son grâce à des tests d'écoute (Howard & Angus, 2017). La perception auditive va être obtenue grâce aux réponses des auditeurs, qui regroupent l'ensemble de leurs opinions. Ainsi les tests subjectifs auront pour but de caractériser les aspects d'un son de manière contrôlée pour en extraire seulement les variables dépendantes du son.

Pour caractériser un son, la psychoacoustique utilise différents termes permettant de représenter certaines dimensions. La sonie ou bruyance (*loudness* en anglais) représente le volume sonore tel qu'il est perçu par un humain. La tonie ou hauteur tonale (*pitch* en anglais) est une échelle entre les fréquences graves et

aigües. Le timbre dépend en partie de la répartition spectrale et regroupe les caractères distinctifs d'un son, c'est notamment grâce au timbre que l'on peut distinguer des voix humaines et des instruments. L'acuité (*sharpness* en anglais) indique la perception d'un bruit comme aigu. Lorsqu'un signal est modulé en amplitude on parle de force de fluctuation si les variations sont lentes et inférieures à 30 Hz et de rugosité si les variations sont plus rapides (au-delà de 30 Hz; Parizet, 2006). La tonalité va caractériser la perception des composantes tonales d'un bruit.

1.4. EFFETS DU BRUIT SUR LES PERFORMANCES COGNITIVES

La cognition humaine correspond à différents processus mentaux liés à la formation des connaissances, au traitement de l'information, au langage, ou encore à la gestion des émotions. Ces processus mettent en jeu différentes fonctions que l'on appelle les fonctions cognitives. Elles regroupent la perception, l'attention, la mémoire, la motricité, le langage et le raisonnement. Une manière d'analyser l'effet du bruit sur les fonctions cognitives consiste à évaluer la performance de participants lors de tâches impliquant certaines fonctions cognitives. Plusieurs études ont été consacré à l'analyse des effets du bruit sur la performance humaine (DeJoy, 1984 ; Jerison, 1959 ; A. P. Smith, 1989, 2012 ; Szalma & Hancock, 2011, 2012) et les résultats sont parfois contradictoires. Par exemple, d'après une méta-analyse de Szalma & Hancock (2011) le bruit, à l'exception du bruit de parole, semble n'avoir qu'un effet plutôt modéré sur les performances à des tâches cognitives. Cette partie aura pour but d'en présenter les effets.

1.4.1. Effet du bruit sur l'attention

A l'origine, les sons et les bruits sont des stimuli à caractère informatif, ils vont nous donner des indices qui peuvent nous être utiles dans certaines situations. Cependant on peut les diviser en deux catégories : les informations pertinentes ou non-pertinentes. Un son pertinent sera utile pour la réalisation d'une tâche, alors qu'un son non-pertinent sera perçu comme une gêne. Nous avons tendance à focaliser notre attention sur les informations pertinentes et à ignorer celles qui ne le sont pas, grâce à des mécanismes d'inhibition ou d'orientation de l'information. Cependant, notre capacité innée à détecter efficacement l'information sonore fait qu'une partie des stimuli auditifs non-pertinents vont passer la barrière attentionnelle. Ceci peut venir impacter les performances cognitives selon différents mécanismes.

La littérature met en évidence un impact du bruit sur les mécanismes attentionnels. Proposer une définition simple ou une théorie générale de l'attention est un exercice difficile (Zanto & Gazzaley, 2014). Une définition encore largement utilisée aujourd'hui a été proposée dès 1890 par William James (James, Burkhardt, Bowers, & Skrupskelis, 1890) :

« L'attention est la prise de possession par l'esprit, sous une forme claire et vive, d'un objet ou d'une suite de pensées parmi plusieurs qui sont présents simultanément [...] Elle implique le retrait de certains objets afin de traiter plus efficacement les autres [...] ».

L'attention est un système complexe et hiérarchisé. Posner (1971 ; 1976) en distingue quatre composantes attentionnelles :

- L'alerte correspond à l'état général d'éveil d'une personne permettant de réagir à des stimulations extérieures (Bastin & Deroux, 2007).
- L'attention sélective permet de sélectionner et traiter des stimuli particuliers parmi les stimulations de l'environnement (Bastin & Deroux, 2007).
- L'attention soutenue et la vigilance permettent de maintenir un niveau attentionnel suffisant pendant une période de temps assez longue (Bastin & Deroux, 2007).
- L'attention divisée correspond à la capacité à répartir ses ressources attentionnelles entre plusieurs tâches ou sources d'informations (Bastin & Deroux, 2007).

Depuis, de nombreux modèles tentent de rendre compte des mécanismes attentionnels. L'un des plus connus est celui de Broadbent (1958). Pour ce dernier, la capacité humaine de traitement de l'information est limitée. Ainsi pour éviter une surcharge d'information, un filtre sélectif serait présent à l'entrée du système nerveux. L'attention sélective permettrait de focaliser l'attention sur des tâches ou informations spécifiques ; l'attention divisée au contraire, permet de porter son attention sur plusieurs tâches ou entrées d'informations (Tiberghien & Abdi, 2002). Néanmoins, malgré une concentration de l'attention sur la tâche principale, grâce à l'attention sélective, des stimuli externes à la tâche peuvent capter notre attention (Folk & Remington, 1998). Cet effet distracteur n'est pas forcément délétère, il est même primordial pour notre survie. Cette capture attentionnelle d'un bruit non pertinent peut nous donner des informations critiques sur notre environnement et favoriser la conscience de situation (Watkins, Dalton, Lavie, & Rees, 2007). Ainsi, les pilotes d'avions ont besoin d'entendre certains bruits comme celui des moteurs qui leur donnent une indication sur leurs bons fonctionnements (Moricot, 2007).

La première étape de traitement est le processus de détection d'un nouveau stimulus dans l'environnement. Une fois que ce stimulus est détecté, des ressources

attentionnelles sont automatiquement allouées au détriment des stimuli pertinents à la tâche. Pour finir, si le stimulus n'est pas pertinent à la tâche il est ignoré, libérant des ressources attentionnelles. Ces différentes étapes de déplacement de l'attention ont donc un coût pour la réalisation de la tâche focale (Parmentier, 2014). Par ailleurs, l'inhibition active des sons distracteurs par l'attention sélective va également avoir un impact. Par exemple, la mise en route de mécanismes de filtrage en mémoire de travail n'est possible que si des ressources cognitives sont encore disponibles (Lavie, Hirst, de Fockert, & Viding, 2004). D'autres auteurs montrent que l'effet du bruit sur l'attention semble également dépendre du type de tâche (A. P. Smith, 1991) et de sa difficulté (Robinson, Vytal, Cornwell, & Grillon, 2013). Ces deux points seront développés dans la partie 1.4.5.

1.4.2. Effet du bruit sur la mémoire

La mémoire est une fonction permettant l'acquisition, le stockage et la récupération d'informations (Reisberg, 2013). D'après le modèle modal de la mémoire (Atkinson & Shiffrin, 1968 ; Waugh & Norman, 1965), après la perception d'un stimulus par un organe sensoriel, les informations vont être stockées dans la mémoire sensorielle pendant un laps de temps très court (quelques millisecondes). Une première sélection des informations pertinentes est réalisée, c'est-à-dire qu'un grand nombre d'informations va être directement oublié. Le reste va pouvoir passer en mémoire à court-terme. On distingue un autre type de mémoire temporaire, appelée mémoire de travail. Dans cette dernière, un nombre limité d'éléments peut être stocké, estimé à 7 ± 2 items pendant quelques secondes (Murdock Jr., 1962). Cette mémoire permet de conserver l'information sur laquelle les traitements cognitifs sont réalisés. Pour finir, certaines informations seront consolidées et stockées en mémoire à long-terme. Cette mémoire est la mémoire permanente, sans limite théorique de stockage. La littérature indique que le bruit peut venir impacter l'ensemble de ces processus mnésiques.

Le bruit peut avoir différents impacts selon le type de mémoire touché. Murphy, Craik, Li, & Schneider (2000) ont comparé les effets du bruit sur la mémoire à court-terme lors d'une tâche de rappel pour différents groupes de sujets (jeunes et âgés). Leurs résultats montrent que l'ajout de bruits a un effet négatif sur la performance de rappel des deux groupes et que cet impact est plus fort pour les personnes âgées. L'encodage en mémoire est altéré par le vieillissement et le bruit. Les chercheurs concluent que les effets du bruit sur les performances de mémoire à court-terme chez les jeunes sont semblables aux effets de l'âge. Dans l'étude de Hygge, Boman, & Enmarker (2003), les résultats ont montré que le bruit de trafic routier et le bruit de parole (62 dB(A) chacun) ont altéré une tâche de rappel libre

(mémoire à court-terme) par rapport au silence. Cependant, un autre type d'effet du bruit peut être observé. Hygge & Knez (2001) ont montré que lors d'une tâche de rappel (sollicitant la mémoire à court-terme), les participants répondaient plus rapidement à la tâche mais au détriment d'erreurs plus nombreuses. Le bruit dégraderait également la mémoire de travail. Le stimulus auditif créerait une interférence et redirigerait l'attention sur des informations non pertinentes à la tâche (Hockey, 1986 ; Jones, 1993 ; Macken, Phelps, & Jones, 2009).

La mémoire à long terme semble également impactée par le bruit (Hygge, Evans, & Bullinger, 2002). Ceci n'est pas surprenant dans la mesure où la consolidation en mémoire à long-terme est conditionnée par certains processus en mémoire à court-terme (Dudai, 2004a, 2004b ; Haist, Gore, & Mao, 2001), eux-mêmes altérés par le bruit. Ainsi l'étude de Hygge, Evans, & Bullinger (2002) a montré que les performances à la fois de mémoire à court-terme et à long-terme étaient impactées après une exposition chronique à des bruits d'aéroports. Ce résultat est en accord avec l'étude de Evans & Lepore (1993), explicitant que l'exposition au bruit chez les enfants peut interférer leur performance de mémoire à long-terme. Cependant, dans leur étude, Colle & Welsh (1976) concluaient que le bruit n'avait pas d'effet sur la mémoire à long-terme. Une langue étrangère était présentée à des sujets (adultes) durant une tâche de rappel (visuel et écrit). Les auteurs concluent que le bruit n'a pas eu d'effet sur la tâche de rappel et donc la mémoire à long-terme, indiquant que l'effet du bruit ne toucherait que la mémoire à court-terme.

1.4.3. Effet du bruit sur l'apprentissage

L'exposition à des facteurs de stress environnementaux comme le bruit de trafic aérien ou routier est également étudié dans le cadre de l'apprentissage. En effet, le bruit semble dégrader la santé des enfants et leur développement cognitif. Une étude transversale (Stansfeld et al., 2005) dans laquelle 2844 enfants fréquentant 89 écoles différentes (Pays-Bas, Espagne, Royaume-Uni) a été réalisée dans le but d'étudier l'effet du bruit d'avion sur la cognition des enfants. Les écoles étaient situées autour de trois grands aéroports et subissaient le bruit chronique qui y est associé (aérien et routier). Les résultats ont révélé une association linéaire entre l'exposition chronique au bruit et la dégradation des compétences de compréhension de lecture et de reconnaissance en mémoire. Ces résultats vont dans le même sens que l'étude de Haines et al. (2001) soulignant également qu'un niveau de nuisance sonore élevé associé au bruit des avions provoquait des troubles de la compréhension de la lecture. Stansfeld et al. (2005) ont montré qu'un facteur de stress environnant discontinu (comme le bruit de trafic aérien ou routier) peut

dégrader le développement cognitif des enfants, en particulier la compréhension de la lecture. Chez les adultes, la vitesse de lecture peut être ralentie par l'ajout d'un bruit de fond (paroles ou musique; Cauchard, Cane, & Weger, 2012).

1.4.4. Effet du bruit sur le niveau de stress

Le bruit peut également perturber un individu au niveau émotionnel. Cette perturbation peut avoir un impact sur les performances cognitives, mais aussi sur la capacité à se reposer, à se détendre. Omniprésent en milieu urbain, le bruit est reconnu pour être une source notable de stress (Cosa & Cosa, 1989 ; Ljungberg & Neely, 2007b) : il n'est pas surprenant de constater que ce dernier est largement utilisé dans les laboratoires comme inducteur de stress (Arnsten & Goldman-Rakic, 1998 ; Evans, Hygge, & Bullinger, 1995 ; Holt, 1993 ; Loeb, 1986 ; J. C. Smith, 1993, p. 211). Selon Hockey (1997), le stress consécutif au bruit provoque une diminution des ressources attentionnelles, ce qui va diminuer la performance de traitement de l'information. Le stress peut également engendrer une stratégie de réponse différente, appelée réponse compensatoire, qui se traduit par un effort accru pour réaliser une tâche ou bien par la recherche d'un compromis entre une plus grande vitesse de réalisation au détriment de la précision (Ljungberg & Neely, 2007a ; Robert & Hockey, 1997).

De par son effet excitateur, le bruit peut avoir un effet inattendu et augmenter les niveaux de vigilance (Hockey, 1970 ; Lundberg & Frankenhaeuser, 1978 ; Szalma & Hancock, 2011). Ceci amène à une amélioration de la performance lors d'une tâche d'attention sélective sous l'effet du stress induit par le bruit. Ce phénomène peut être expliqué par une première théorie établissant que le stress épuise les ressources attentionnelles disponibles, ainsi le peu de ressources restantes sont consacrées aux traitements des informations pertinentes à la tâche (Chajut & Algom, 2003 ; Kahneman, 1973). Nous sommes en quelques sortes « sourds » aux informations auditives non pertinentes. Ainsi, Hockey (1970) a montré que lors d'une tâche de suivi de différents éléments, le suivi de la tâche principale était amélioré lors de condition bruyantes alors que les éléments de la tâche secondaire étaient détectés moins souvent.

Cependant, une autre théorie stipule que l'information non-pertinente à la tâche est rendue hyper-accessible en raison du stress. Ainsi les informations non-pertinentes seront perçues comme des intrusions et détourneront l'attention vers des pensées non appropriées à la réalisation de la tâche principale (Chajut & Algom, 2003 ; Wegner & Erber, 1992).

Le bruit peut également être source de stress sans être présent. Il a été montré que le stress sonore peut nuire à la performance même en l'absence de bruit en raison de l'anticipation du facteur de stress sonore (S. Cohen & Spacapan, 1984).

Les performances cognitives peuvent être protégées contre le stress grâce à des efforts compensatoires et à l'utilisation de stratégies d'adaptation cognitives (*coping* en anglais), pour continuer à réaliser la tâche de manière adéquate (Lazarus & Launier, 1978). Cependant cette réponse compensatoire se fait aux dépens de coûts comportementaux et physiologiques (Robert & Hockey, 1997). Ainsi, malgré une exécution correcte de la tâche, des réponses physiologiques altérées (comme une fréquence cardiaque élevée) peuvent être observées en raison du stress (Mandrick, Peysakhovich, Rémy, Lepron, & Causse, 2016).

1.4.5. Effets du type de tâche et du type de bruit

Trois théories ont été émises pour tenter d'expliquer les effets du bruit selon le contexte. La première théorie est celle de l'éveil (Hebb, 1955 ; Broadbent, 1971, 1978), elle établit que les effets stressants du bruit sont modérés par le type de tâche, l'intensité, la durée et l'intermittence du bruit. D'après la loi Yerkes-Dodson (Yerkes & Dodson, 1908), le niveau d'éveil (*arousal* en anglais) optimal pour une tâche est inversement corrélé à son niveau de difficulté. Ainsi, les tâches plus difficiles sont associées à un niveau d'éveil optimal plutôt bas (M. W. Eysenck, 1982). De ce fait, ce type de tâche devrait être plus impacté par la présence d'un bruit. De plus, les tâches cognitives et de communication devraient subir de plus grandes dégradations des performances par rapport aux tâches perceptives et psychomotrices. Ils établissent également qu'une intensité plus élevée et une durée de présentation plus longue devraient avoir des effets négatifs plus importants.

D'après la seconde théorie, celle de Poulton (1979), les effets du bruit sont similaires en fonction de la tâche et du type de bruit (parole vs bruit) ; mais l'intensité, la durée et son intermittence modèleraient les effets du bruits. L'auteur précise que l'intensité peut moduler les effets du bruit et qu'un bruit de courte durée devrait améliorer les performances en raison de l'excitation engendrée, comparé à une durée d'exposition plus longue. Selon la théorie, l'effet le plus délétère provient du caractère intermittent du bruit, avec un effet perturbateur plutôt qu'excitateur.

La troisième théorie est celle de l'adaptabilité maximale de Hancock (1989). Elle prédit que les effets du bruit varient en fonction du type de tâche (les performances sur les tâches cognitives exigeantes ou de communication sont plus impactées que celles pour les tâches perceptives et motrices), du type de bruit (le

bruit de parole est plus perturbant en raison d'une compétition des ressources cognitives), de son intermittence, de sa durée (longue durée) et de l'intensité (forte intensité) de l'exposition.

Ces trois théories amènent à des prédictions similaires pour les effets du bruit dans certaines conditions (intermittence du bruit, intensité et durée) mais des prédictions différentes pour d'autres catégories (paroles vs bruit). Dans le cas de l'intermittence du bruit, les trois théories font la même prédiction qu'un bruit intermittent induit une plus grande altération des performances qu'un bruit continu (Eschenbrenner, 1971). Cependant, les trois théories diffèrent sur la manière dont la fréquence d'apparition d'un bruit interagit avec les autres variables.

Au-delà de ces trois théories, de nombreux autres auteurs ont essayé de mieux cerner l'ensemble des facteurs qui peuvent interagir avec les effets du bruit. Szalma & Hancock (2011) ont réalisé une méta-analyse montrant également que l'effet du bruit dépend du type de tâche cognitive. Ainsi, les tâches impliquant la perception visuelle n'ont qu'un effet du bruit négligeable. Cependant, pour les tâches psychomotrices, l'effet du bruit ne s'est révélé que moyennement délétère aux performances motrices. Les tâches requérant des capacités de communication orale ou écrite montrent un effet du bruit moyen. Pour finir il y aurait un effet délétère du bruit sur l'exécution des tâches cognitives, mais de faible à moyen impact.

Toujours d'après la méta-analyse de Szalma & Hancock (2011), le type de bruit a une grande importance. En effet, un bruit intermittent et fluctuant sera plus gênant qu'un bruit continu lors d'une tâche (Muzammil & Hasan, 2004). Ceci semble d'autant plus vrai lorsque le bruit intervient lors de phases critiques d'une tâche de mémoire à court-terme (A. P. Smith, 1989 ; Tremblay, MacKen, & Jones, 2001), comme par exemple, au moment d'un calcul (Salamé & Wittersheim, 1978). Il a été montré qu'un bruit dont l'occurrence est prédictible est bien moins distracteur sur une tâche psychomotrice complexe qu'un bruit périodique ou continu (Eschenbrenner, 1971 ; Finkelman, Zeitlin, Romoff, Friend, & Brown, 1979). Les bruits fluctuants semblent particulièrement pénalisants (Szalma & Hancock, 2011). En effet la variation des fréquences ou du niveau sonore semble capturer l'attention plus fortement que des sons plus monotones (Loeb, 1986). Ceci se rapprochant des études portant sur la distraction auditive, au cours desquels des sons distracteurs viennent capturer l'attention et impacter la tâche focale (Sabri et al., 2014). De plus, lorsque le bruit a un niveau élevé et qu'il produit des rafales de son fréquent et court, un effet de sursaut peut survenir détournant complètement l'attention vers le bruit (Casali & Robinson, 1999).

Il semble que le bruit de parole est particulièrement dérangent par rapport à d'autres types de bruit (Salamé & Baddeley, 1982 ; Schlittmeier, Feil, Liebl, &

Hellbrück, 2015 ; Sörqvist, 2014). De même pour la musique, qui peut être délétère si elle contient des paroles. Néanmoins, cet effet n'est pas retrouvé dans toutes les études. Dans l'étude de Hygge et al. (2003) le bruit de parole n'est pas plus gênant que le bruit de trafic routier. A ce titre, le type de tâche en cours a certainement un rôle. Par exemple la lecture semble être davantage pénalisée par des bruits de parole car des ressources cognitives communes (langage) vont être sollicitées (R. C. Martin, Wogalter, & Forlano, 1988 ; Sörqvist, Halin, & Hygge, 2010).

Les fréquences présentes dans un bruit vont également moduler les performances. Par exemple, un bruit grave (< 500 Hz) peut augmenter les temps de réaction par rapport à des bruit aigus (> 8000 Hz) durant une tâche de performance continue (Naserpour et al., 2014). Par ailleurs, certains bruits peuvent même être bénéfiques. Par exemple, les résultats de Landström et al. (1991) indiquent que l'ajout d'un bruit rose (qui est un signal aléatoire dont la densité spectrale décroît de manière logarithmique) sur un bruit de ventilation diminue la gêne ressentie et augmente les performances et la vigilance. De la même manière, Wasserman & Segool (2013) ont montré que des participants avaient de meilleures performances d'attention visuelle avec un bruit rose qu'avec un bruit blanc ou un bruit de télévision. Cependant, cet effet n'est pas visible sur toutes les tâches cognitives. Par exemple, Chitwood et Vaughn (2018) ont analysé les performances de compréhension de lecture avec trois types de conditions sonores : un bruit rose, de la musique pop et du silence. Les résultats ont montré que les conditions sonores n'avaient pas influencé les performances de lecture. Ces résultats corroborent le fait que l'effet du bruit dépend de son type ainsi que du type de tâche réalisée. Proverbio et al. (2018) ont testé l'impact de trois conditions sonores : pluie forte (similaire à du bruit rose), silence et musique classique, ceci pendant une tâche de calcul arithmétique. Les résultats ont montré que le silence était néfaste lorsque les opérations arithmétiques étaient difficiles, avec une moins bonne précision et des temps de réactions plus lents par rapport à des conditions de bruit de pluie ou de musique. Le bruit de pluie et la musique ont amélioré les performances des participants par rapport au silence, mais cet effet dépendait également de leur personnalité, point que nous développerons plus tard.

L'intensité ne semble pas être un facteur très déterminant ou modérateur sur l'effet du bruit. Par exemple, le bruit de parole aura toujours un effet gênant sur la performance, peu importe son intensité, dans l'intervalle 55-95 dB(A) (Jones, 1990). De même, Tremblay & Jones (1999) ont montré que les changements d'intensité (allant de 55 à 85 dB(A) de différentes tonalités n'avaient pas produit d'effets perceptibles sur les résultats d'une tâche de rappel. Cependant lorsque les niveaux dépassent 95 dB les temps de réactions des participants sont impactés (Broadbent, 1953, 1979 ; Wilkinson, 1963). Notamment, une augmentation soudaine du volume

sonore jusqu'à 90 dB peut créer une réponse physiologique importante (Hatton, Berg, & Graham, 1970). Il est possible de penser que la parole a un effet plus spécifique de capture attentionnelle, indépendant du niveau sonore, alors qu'un niveau sonore élevé deviendra délétère en raison de la fatigue ou du stress qu'il va occasionner (Szalma & Hancock, 2011).

Concernant la durée d'exposition, les auteurs présentent des résultats contradictoires. D'une part, une longue durée d'exposition serait plus délétère qu'une courte exposition (A. P. Smith, 1989), comme c'est le cas pour Smith & Broadbent (1985). Ces derniers ont montré que les sujets doivent être exposés au bruit pendant au moins 30 minutes avant que ce dernier n'influe sur la vitesse de réalisation de la tâche. De même, pour Evans et al. (1995), une longue exposition au bruit (bruit chronique) implique un effet sur le stress avec une augmentation de l'hormone du stress (neuroendocrine) et du rythme cardiaque. Il est important de noter que les participants étaient également plus agacés par le bruit lorsque celui-ci durait longtemps. D'autre part, Szalma & Hancock (2011) concluent dans leur méta-analyse que le bruit a davantage d'effets négatifs sur la performance pour des périodes d'exposition courtes (environ 1 minute de médiane), alors que pour des durées plus longues, l'effet est atténué. Ils argumentent ce résultat par la capacité des individus à s'adapter au stress sonore. Par ailleurs, la conclusion principale de l'étude de Ljungberg & Neely (2007b) était que les expositions relativement brèves aux bruits et aux vibrations (conformes à des niveaux observables dans des véhicules industriels) n'affectaient pas significativement les tâches de performance cognitive ou les niveaux de cortisol salivaire, ceci en dépit du fait que le travail dans ces environnements peut être jugé plus difficile ou stressant. Pour finir, Ryherd & Wang (2007), ont montré que différentes durées d'exposition au bruit de ventilation (de 55 à 75 dB(A)) n'avaient pas d'impact sur les performances à trois tâches (écriture, raisonnement grammatical et mathématique), mais que l'exposition au bruit avait une influence sur la perception subjective. Dans cette étude, les participants trouvaient le bruit plus calme et moins agaçant lorsque la durée d'exposition était augmentée. Les participants se seraient donc adaptés et habitués à ces bruits au fil du temps. Finalement, pour Landström (2004), les tâches monotones et répétitives nécessitent des expositions plus longues au bruit pour qu'il y ait un effet sur les performances attentionnelles.

1.4.6. Bruit et personnalité

Un autre axe d'analyse des effets du bruit concerne la personnalité de celui qui y est soumis. La personnalité définit le caractère, le tempérament, le comportement et les traits émotionnels d'une personne. Plusieurs théories ont

émergé afin d'en définir scientifiquement les contours. Jung (1939) a été l'un des premiers à définir les concepts d'introversion et d'extraversion de la personnalité. Cattell (1965) a ensuite défini 16 facteurs de la personnalité (expressivité émotionnelle, intelligence, stabilité, dominance, impulsivité, conformité de groupe, noirceur, sensibilité, suspicion, imagination, ruse, culpabilité, rébellion, autosuffisance, autocontrôle et stress). Eysenck (1968) a défini un modèle plus simple à trois dimensions, l'extraversion, le neuroticisme et le psychoticisme. Un modèle très connu de personnalité est le *Big Five* de Costa & McCrae (1985). Ces auteurs ont défini cinq grands facteurs de la personnalité. En général, les traits de personnalité sont réalisés par auto-questionnaires, le sujet s'évalue lui-même en répondant à de nombreuses questions (Lieury, 2013). Ces questionnaires permettent de classer les personnes selon plusieurs dimensions de la personnalité. Nous allons nous concentrer sur l'analyse du modèle d'Eysenck (1968) qui se révèle plus simple de par l'utilisation de seulement trois dimensions de la personnalité : l'extraversion (opposé à l'introversion), le neuroticisme (stabilité/instabilité émotionnelle) et le psychoticisme (agressivité, hostilité). L'extraversion correspond à des personnes désinhibées, sociables, insouciantes, impulsives et qui recherchent les sensations fortes. Contrairement à l'introversion qui caractérise les personnes solitaires, effacées et réservées. Les personnes avec un fort neuroticisme seront des personnes exprimant des émotions telles que l'anxiété, la colère, la culpabilité, la déprime. Quant au psychoticisme, il caractérise des personnes froides, impersonnelles, hostiles, non émotives, peu enclines à aider autrui (H. J. Eysenck, 1968). Ce modèle de personnalité est évalué par l'*Eysenck Personality Questionnaire* (EPQ). Cette conception a l'avantage de distribuer les individus selon une courbe de Gauss, la majorité des individus ayant à la fois des tendances introverties et extraverties (H. J. Eysenck, 1979). Des versions révisées (S. B. G. Eysenck et al., 1985), abrégées (Francis, Brown, & Philipchalk, 1992) puis traduites en français (Bouvard, Aulard-Jaccod, Personneaux, Hautekeete, & Rogé, 2010 ; Lewis, Francis, Shevlin, & Forrest, 2002) ont ensuite été élaborées.

La littérature indique que les plus grands modérateurs de performances cognitives en environnement sonore sont les traits de personnalité des individus. Il a été observé que les introvertis, par rapport aux extravertis, expriment une gêne plus importante lors de tâches exigeant de la concentration et du raisonnement logique dans des conditions bruyantes (M. W. Eysenck & Graydon, 1989 ; Belojević & Jakovljevic, 2003 ; Stansfeld, Clark, Jenkins, & Tarnopolsky, 1985). De la même manière, la musique impacte davantage les performances cognitives des personnes introverties (Babamiri, Moatamedzadeh, Golmhammadi, Derakhshan, & Farhadian, 2017 ; Dobbs, Furnham, & McClelland, 2011 ; Furnham & Strbac, 2002 ; Kou, McClelland, & Furnham, 2018 ; Proverbio et al., 2018 ; Yang, McClelland, & Furnham,

2016). Furnham & Bradley (1997) ont montré que les introvertis avaient de moins bonnes capacités de mémoire lorsque la tâche était réalisée avec de la musique pop. De manière plus générale, la personnalité, notamment l'introversion et le neuroticisme, est positivement liée à la sensibilité au bruit et à l'agacement pendant un bruit (Ohrström, Björkman, & Rylander, 1988 ; Shepherd, Heinonen-Guzejev, Hautus, & Heikkilä, 2015 ; van Kamp & Davies, 2008).

La sensibilité individuelle au bruit est également un important modérateur de performance. Elle se réfère à une mesure individuelle et subjective de l'aversion et/ou la réactivité au bruit et aux environnements bruyants (Weinstein, 1978). Un affect négatif (comme l'agacement) et une sensibilité au bruit plus élevée ont été associés à une réduction des capacités de mémoire de travail et d'attention, en raison d'une excitation excessive (Jelínková, Pícek, & Hyncica, 1988 ; Gaillard, 2008). Ainsi, Belojević, Öhrström, & Rylander (1992) ont montré que le bruit de trafic routier (55 dB(A) et 75 dB(A)) n'a pas d'effet généraux sur les performances en mémoire à court-terme, mémoire à long-terme, de raisonnement spatial, ni de calcul arithmétique, sur des sujets répartis selon trois groupes de sensibilité au bruit. Seules les personnes les plus sensibles au bruit présentaient des performances significativement plus basses aux tâches de mémoire à court-terme et de calcul mental. Ces dernières percevaient également le bruit comme étant plus agaçant. White et al. (2017b) a analysé l'effet du bruit (bruit d'avion vs silence) de trois catégories de personnes plus ou moins sensibles au bruit. Ses résultats montrent que lors de la réalisation de tâches cognitives, les personnes fortement sensibles au bruit ont des réponses physiologiques plus importantes (rythme cardiaque plus élevé), ce qui indique qu'elles sont moins capables de s'adapter au bruit que les personnes peu sensibles au bruit. Belojević et al. (1992) ont montré que la sensibilité au bruit est le plus gros facteur responsable des différences observées lors de tâches de mémoire à court-terme et de recherche en mémoire. Les personnes sensibles au bruit avaient les plus faibles performances. De plus elles ont exprimées être plus agacées que les personnes peu sensible au bruit pendant la réalisation des tâches. Finalement, Benfield et ses collègues (2014) ont montré que la sensibilité au bruit était prédictive de l'attitude que les participants avaient envers un bruit et de son acceptabilité.

1.4.7. Autres modérateurs des effets du bruit sur la performance cognitive

Différents autres modérateurs peuvent induire des performances différentes en présence de bruit. La qualité du sommeil peut moduler les effets du bruit sur les performances cognitives. En effet, le bruit peut améliorer les performances

cognitives sur des tâches simples, par exemple en excitant des personnes peu éveillées, leur permettant d'atteindre un niveau d'éveil suffisant pour la réalisation d'une tâche (Humphreys & Revelle, 1984). De plus, lorsque l'on combine les effets du bruit avec ceux de la privation de sommeil, les temps de réaction sont meilleurs comparés à ceux durant l'exposition au bruit ou à la privation de sommeil pris séparément (Corcoran, 1962 ; Wilkinson, 1963).

Pour certaines tâches cognitives on note une interaction entre le sexe et le bruit. Par exemple, Gulian & Thomas (1986) ont analysé une activité de travail sur des sujets féminins et masculins. Leurs résultats montrent que le bruit affectait le rythme de travail des femmes, qui se retrouvait ralenti, contrairement aux hommes. Une autre étude de Hambrick-Dixon (1988) a testé l'exposition au bruit de métro sur la vigilance d'enfants et a montré que seules les performances des filles étaient impactées négativement par le bruit. Hygge & Knez (2001), quant à eux, ont montré que les femmes présentaient de meilleures performances lors d'une tâche de résolution de problème et de rappel de mots avec un bruit de ventilation. D'autres études ne montrent aucune interaction entre le bruit et le sexe (Edmonds & Smith, 1985 ; Ljungberg & Neely, 2007a ; B. A. Wright, Peters, Ettinger, Kuipers, & Kumari, 2016). Une interaction entre l'exposition au bruit, le sexe et le rythme circadien (rythme biologique lors d'une journée de 24h) a cependant été observée (Loeb, Holding, & Baker, 1982). Dans cette étude, les résultats montrent que le bruit a provoqué une dégradation des performances des hommes les matins alors qu'elles étaient meilleures l'après-midi. Les femmes avaient tendance à montrer l'effet opposé, c'est-à-dire de s'améliorer sous l'effet du bruit le matin mais être plus performantes en condition silencieuse en fin de journée.

L'âge est également un facteur modérateur, par exemple, Schreckenber, Griefahn, & Meis (2010) ont montré une sensibilité au bruit plus élevée pour les personnes âgées par rapport aux jeunes. On peut donc supposer qu'elles seront plus impactées par le bruit. De plus, Hasher & Zacks (1988) ont montré que la capacité à inhiber l'information pertinente était la principale source de changement cognitif lié à l'âge. Ces résultats vont dans le même sens qu'une autre étude (J. von Wright & Nurmi, 1979) montrant que les adultes sont plus distraits par les interférences des informations non pertinentes que les enfants.

Le quotient intellectuel (QI) ainsi que les performances cognitives de base peuvent également moduler cette relation bruit/performances cognitives. Il a été montré que les personnes avec un niveau intellectuel inférieur présentaient des variations de leurs performances cognitives plus importantes (Jensen, Gelfand, Kounios, & Lisman, 2002 ; Rabbitt, Osman, Moore, & Stollery, 2001). Ainsi, des personnes avec un QI inférieur pourraient avoir des performances moins stables dans des conditions bruyantes.

1.4.8. Cas particulier du bruit tonal

Des études ont montré qu'une tonalité pure dans un bruit pouvait rendre le bruit plus agaçant (Kryter & Pearsons, 1965 ; Landström et al., 1991 ; White, Bronkhorst, & Meeter, 2017a). Les composantes tonales dans un bruit large bande influencent la gêne et le volume ressenti (Hellman, 1982, 1985). Par exemple, Landström et al. (1993) ont constaté que la gêne était plus importante lorsque qu'un bruit tonal était comparé à un bruit large bande, d'autant plus si les fréquences du bruit tonal étaient hautes (1000 Hz vs 100 Hz). De même, Grimaldi (1958) a mis en évidence le fait que des participants exposés à des tonalités situées entre 2400 et 4800 Hz pendant une tâche de coordination de mouvement présentaient des temps de réaction plus lents et un taux d'erreur plus élevé.

D'autres études ont tenté de corrélérer l'impact du bruit tonal avec la performance humaine et la perception du bruit. Parmi celles-ci, l'étude de Ryherd & Wang (2008) visait à étudier les différences de performance et de perception au cours de différentes tâches. Différents bruits de ventilation à caractère tonal ont été administrés pendant 55 minutes. Ils possédaient différentes tonalités (120, 235, 595 Hz) à des niveaux allant de 40 à 47 dB(A). Les participants réalisaient trois tâches différentes : une tâche d'écriture, une tâche de raisonnement grammatical et une tâche mathématique. Les résultats de cette étude ont montré que les conditions sonores n'avaient pas d'effet significatif sur la performance. Cependant la perception des sons et le ressenti subjectif étaient corrélés, ainsi le bruit possédant le plus grand nombre de tonalités était perçu plus distrayant, gênant, grave et fluctuant que les autres bruits. Dans une autre étude des mêmes auteurs (Ryherd & Wang, 2007) évaluant les mêmes tâches, une performance diminuée aux tâches correspondait à des bruits perçus comme étant plus graves, fluctuants et tonals. Et au contraire, les performances étaient améliorées lorsque les bruits avaient été perçus aigus, forts et distrayants. Ces résultats sont en accord avec d'autres études montrant que la performance et la perception subjective du bruit sont liées (Bowden, 2006 ; Bowden & Wang, 2004). D'autres auteurs sont allés plus loin en concluant que le ressenti subjectif pouvait affecter l'effet du bruit sur les tâches cognitives, en altérant les performances (White, Meeter, & Bronkhorst, 2012). On peut également souligner l'étude de Lee et al. (2017) montrant une tendance à une diminution de la précision lorsque la présence de tonalités était plus forte (un calcul de la prééminence des tonalités a été utilisé). Cette étude montre principalement que la sonie est plus fortement corrélée à la gêne que la tonalité d'un bruit.

1.5. MESURES PSYCHOPHYSIOLOGIQUES DE L'EFFET DU BRUIT

La partie précédente a montré que le bruit pouvait avoir un impact positif, négatif, voire pas d'impact sur les performances cognitives. Lorsque nous réalisons une tâche, l'état physiologique peut être sensiblement modifié et ce changement peut être quantifié grâce à des mesures psychophysiologiques. Ce type de mesure est couramment utilisé par exemple pour mesurer la charge mentale (Causse, Chua, Peysakhovich, Campo, & Matton, 2017 ; Causse, Sénard, Démonet, & Pastor, 2010). L'avantage des mesures psychophysiologiques par rapport aux plus classiques questionnaires subjectifs réside dans le fait qu'elles permettent d'obtenir des indications théoriquement plus objectives de l'état mental des personnes (les individus n'ont généralement pas de contrôle ou d'influence sur leur activité physiologique). Elles peuvent nous offrir un aperçu sans biais de l'impact du bruit à un instant donné.

Il a ainsi été montré que l'exposition au bruit avait un effet physiologique non négligeable sur le corps humain. Par exemple, le bruit peut perturber l'équilibre hormonal (Babisch, 2002, 2003 ; Lundberg & Frankenhaeuser, 1978). Il a été montré qu'il y avait une augmentation du taux de cortisol (une des hormones principales du stress) chez les humains exposés à du bruit de trafic aérien et routier pendant le sommeil (Spreng, 2000).

Dans les parties suivantes, nous présenterons les deux types de mesures psychophysiologiques qui ont été utilisés durant cette thèse, l'électroencéphalographie et l'électrocardiographie. Ces deux mesures permettent d'analyser l'activité cérébrale et cardiaque et sont impactées par les effets du bruit. De plus, ce sont des mesures physiologiques faciles d'utilisation et non-intrusives.

1.5.1. Électroencéphalographie

1.5.1.1. Neuroanatomie

Le système nerveux humain est composé de l'encéphale, de la moelle épinière et des nerfs. L'encéphale regroupe le cerveau, le tronc cérébral et le cervelet. Le cerveau constitue l'organe principal des fonctions cognitives. Ce dernier est divisé en deux hémisphères symétriques, le droit et le gauche. Le cerveau est également composé de cinq lobes (Figure 13) :

- le lobe frontal, situé à l'avant du cerveau. Ce lobe intervient dans le raisonnement, la planification, l'organisation, le langage, la mémoire à court-terme et le mouvement volontaire (Hendelman, 2013) ;
- le lobe temporal, situé sur la partie latérale inférieure du cerveau, au-dessus de l'oreille. Cette zone contient les aires primaires de l'audition et du langage et jouerait un rôle important dans la mémoire et la vision des formes complexes (Hendelman, 2013) ;
- le lobe pariétal, situé en arrière du lobe frontal et au-dessus du lobe temporal. Il joue un rôle important dans l'intégration d'informations sensorielles (audition, vision, toucher). Cette région du cerveau serait impliquée dans la perception de l'espace, le contrôle visuo-moteur et dans l'attention (Hendelman, 2013) ;
- le lobe occipital, situé à l'arrière de la tête. Ce lobe est le siège du cortex visuel permettant la reconnaissance des images (Hendelman, 2013).

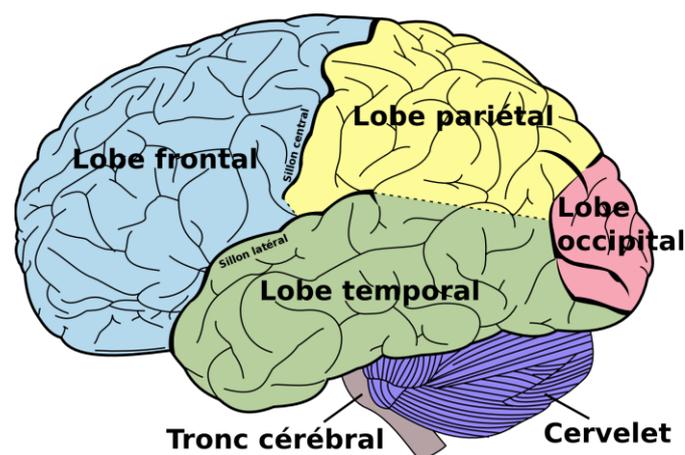


Figure 13 : Illustration de l'encéphale avec les différents lobes du cerveau en vue latérale gauche

1.5.1.2. Fonctionnement de l'EEG

L'électroencéphalographie (EEG) de surface est une technique d'imagerie cérébrale qui mesure de manière non-invasive l'activité électrique des neurones au niveau du scalp. Les neurones sont les composants de base du système nerveux et vont avoir pour rôle de recevoir et transmettre l'information. Les neurones forment des réseaux à travers lesquels circule l'influx nerveux (potentiel d'action), mécanisme électrique de transmission. Ils sont composés d'un corps cellulaire, de dendrites et d'un axone (Figure 14). Pour résumer, un neurone peut être assimilé à un dipôle générant des champs électriques correspondant à la dépolarisation des synapses dendritiques. L'EEG de surface, effectuée par des électrodes disposées sur le scalp,

ne peut pas enregistrer l'activité trop faible d'un neurone individuel, dont la tension électrique est de l'ordre du millivolt en intracellulaire et du microvolt en extracellulaire. Ainsi, pour pouvoir mesurer l'activité neuronales au niveau du scalp, il est nécessaire d'enregistrer une population importante de neurones synchronisés, c'est-à-dire, qui dépolarisent en même temps et à la même fréquence. Néanmoins, malgré une population importante de neurones, cette agglomération peut être problématique en raison de l'orientation des dipôles. En effet, selon l'orientation, la somme des signaux peut être annulée, tel que présenté dans la Figure 15.

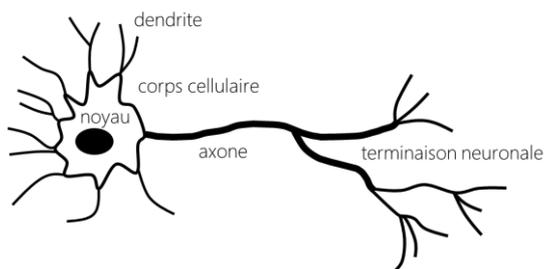


Figure 14 : Illustration schématique d'un neurone composé d'un corps cellulaire comprenant un noyau et des dendrites, un axone et des terminaisons neuronales

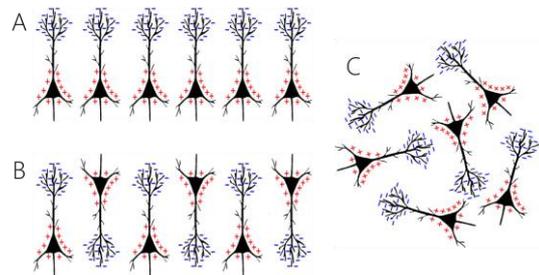


Figure 15 : Disposition de dipôles de neurones générant un signal différent au niveau du scalp. (A) La somme des signaux sera négative. (B) Les signaux positifs et négatifs s'annuleront et le signal ne pourra pas être enregistré. (C) L'arrangement aléatoire ne permettra pas de mesurer un signal positif ou négatif. (d'après Jackson & Bolger, 2014)

De plus, la surface des hémisphères cérébraux, appelée cortex (substance grise composée des corps cellulaires des neurones), est fortement plissée et forme des circonvolutions (Figure 16), qui rendent difficile la localisation des sources et l'étude des processus neurocognitifs. En raison des circonvolutions du cortex, les neurones peuvent être perpendiculaires à la surface, on les appelle dans ce cas des dipôles radiaux ; ou bien ils peuvent être parallèles à la surface et dans ce cas ils sont appelés dipôles tangentiels (Figure 17). Les dipôles radiaux contribuent le plus au signal EEG en raison de leur orientations alors que les tangentiels y participent peu. Ainsi, bien qu'une population de neurones soit synchrone, les champs électriques des différents neurones peuvent s'annuler les uns les autres plutôt que s'additionner et devenir plus intenses. Les signaux EEG enregistrés au niveau du scalp sont donc complexes et nécessitent l'activation de populations de neurones synchronisés et dirigés dans la même orientation (Nunez, Nunez, Srinivasan, & Srinivasan, 2006 ; Nunez & Srinivasan, 2006). Un avantage non négligeable de la technique d'imagerie

EEG est qu'elle possède une bonne résolution temporelle, ce qui permet d'enregistrer des variations rapides de l'activité cérébrale, inférieures à la milliseconde.

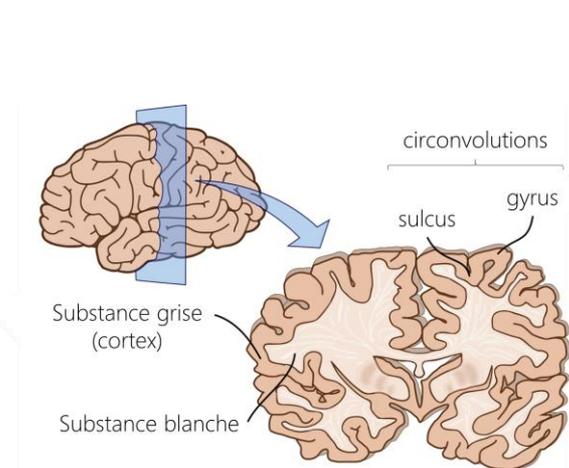


Figure 16 : Coupe frontale du cerveau présentant les circonvolutions du cortex (d'après Budday, Raybaud, & Kuhl, 2014)

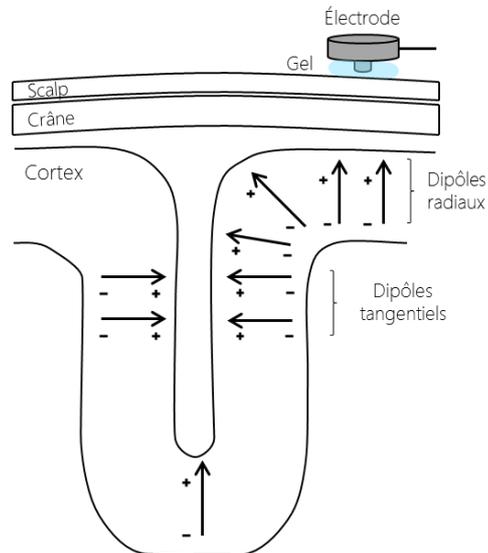


Figure 17 : Illustration de dipôles dans différentes orientations par rapport au crâne (d'après M. X. Cohen, 2014)

1.5.1.3. Métriques EEG

Les premières études sur l'EEG ont porté sur les rythmes oscillatoires en fonction des états de vigilance (Berger, 1929). Berger avait établi qu'il existait différentes amplitudes d'oscillations comprises entre 8 et 12 Hz en fonction de l'état d'éveil : actif, détendu, somnolent, endormi, sommeil profond, coma. En effet, l'activité spontanée du cerveau, c'est-à-dire l'activité continue, est constituée d'oscillations à des fréquences allant de 1 à 100 Hz. Ces oscillations sont dues à l'activité individuelle de plusieurs neurones ou à leur interaction. On distingue classiquement cinq bandes de fréquences (aussi appelées ondes ou rythmes) associées à différents états cognitifs (Niedermeyer & Silva, 2005) :

- Bande delta : 1-4 Hz ;
- Bande thêta : 4-8 Hz ;
- Bande alpha : 8-13 Hz ;
- Bande bêta : 13-30 Hz ;
- Bande gamma : > 30 Hz.

Une autre méthode pour étudier les signaux EEG est de les analyser d'un point de vue temporel plutôt que fréquentiel. On parle dans ce cas d'activité

évoquée, c'est l'activité du cerveau enregistrée sur une courte période de temps (moins d'une seconde) en réponse à un évènement ou un stimulus spécifique. Ainsi, les changements d'amplitude, avant, pendant et après l'évènement, sont mesurés et comparés, c'est ce qu'on appelle des potentiels évoqués (ou ERP ou *event-related potential* en anglais). Ces changements d'amplitude étant faibles, cette technique nécessite de faire la moyenne de beaucoup de signaux et d'avoir autant de répétitions de l'évènement d'intérêt que possible. Dans ce manuscrit, nous nous focaliserons sur les mesures fréquentielles de l'EEG.

1.5.1.4. Effets du bruit sur l'activité cérébrale

Des études montrent que l'effort cognitif semble augmenter en présence d'un bruit. Mandrick et al. (2016) ont mis en évidence le fait que l'activité préfrontale était plus importante lorsque la tâche était réalisée en présence de stressors auditifs. Toutefois, la performance à la tâche n'était pas modifiée en raison de stratégies de compensation (coping) permettant de maintenir des performances suffisantes à la tâche. Les effets de coping correspondent à un effort supplémentaire pour faire face à un évènement difficile ou menaçant (Lazarus & Launier, 1978) comme justement un bruit stressant. L'effort supplémentaire est visible par des réponses physiologiques modifiées (Robert & Hockey, 1997). Tyson (1987) a conclu qu'une réduction de la puissance de la bande alpha était un bon indicateur du succès de la stratégie de coping adoptée par les participants face à un stimuli auditif stressant. Aussi, le coping peut prendre la forme d'une consommation de ressources cognitives supplémentaires afin de procéder à l'inhibition du bruit (Bidet-Caulet, Mikyska, & Knight, 2010). Sabri et al. (2014) ont mené une étude ayant pour objectif d'analyser les réponses neurales liées à l'inhibition des sons non pertinents. Cette étude utilisait une tâche de n-back sollicitant la mémoire de travail. Les résultats montrent une activation plus forte des régions frontales et pariétales en raison de la présence d'informations non pertinentes (bruit) durant la tâche. De plus, cette activation était associée à une charge de travail plus élevée et une attention sélective réduite. Ces résultats montrent la nécessité de mobiliser des ressources supplémentaires pour faire face au bruit au détriment de la tâche focale. Cependant, le résultat inverse peut également se produire. Ainsi, d'autres études montrent que la perception de bruit de type alarmes auditives peut être diminuée par une forte charge cognitive en raison d'une surdité inattentionnelle aux alarmes (Dehais et al., 2014 ; Giraudet, St-Louis, Scannella, & Causse, 2015).

Ainsi, la mesure de la charge mentale durant une tâche donne potentiellement une mesure indirecte de la consommation de ressources cognitives par le bruit.

Marqueur EEG de la charge cognitive

La charge cognitive (aussi appelée charge mentale) est un des concepts les plus étudiés dans le domaine des facteurs humains (Young, Brookhuis, Wickens, & Hancock, 2015), mais il reste paradoxalement encore difficile à définir. Malgré les nombreuses définitions proposées, il n'y a pas d'accord universel. La charge cognitive exprime deux composantes : les exigences de la tâche et l'impact sur l'humain (Schlegel, 1993). Les exigences de la tâche peuvent prendre différentes formes : la pression temporelle, la complexité de la tâche, ou encore les ressources disponibles en fonction de la demande (Young et al., 2015). Ainsi, on peut résumer la charge cognitive comme étant une structure multidimensionnelle représentant la charge qu'impose l'exécution d'une tâche sur le système cognitif de la personne (Paas, Tuovinen, Tabbers, & Gerven, 2003 ; Paas, van Merriënboer, & Adam, 1994).

Comme nous l'avons vu, le bruit peut venir augmenter la charge cognitive associée à une tâche, en conséquence de processus de compensation déployés pour contrer les effets du stress (Mandrick et al., 2016). De plus, l'inhibition des bruits consomment des ressources cognitives qui ne sont alors peut-être plus suffisamment nombreuses pour la tâche principale (Bidet-Caulet et al., 2010 ; Sabri et al., 2014). L'EEG va permettre d'évaluer l'activité cérébrale associée à certains processus cognitifs et perceptifs tels que cette variation de la charge cognitive (Antonenko, Paas, Grabner, & van Gog, 2010 ; Gevins & Smith, 2006). Ainsi, une augmentation de la charge cognitive sur l'EEG va se traduire par une diminution de la puissance spectrale sur la bande alpha dans la zone pariéto-occipitale (Jensen et al., 2002 ; Kamzanova, Kustubayeva, & Matthews, 2014 ; Pesonen, Hämäläinen, & Krause, 2007). Simultanément, une augmentation de la puissance spectrale de la bande thêta peut être mesurée dans la zone frontale (Antonenko et al., 2010 ; Brouwer et al., 2012 ; Gevins et al., 1998 ; Gevins & Smith, 2000 ; Gomar, Althaus, Wijers, & Minderaa, 2006 ; Holm, Lukander, Korpela, Sallinen, & Müller, 2009 ; Jensen & Tesche, 2002 ; Missonnier et al., 2006 ; Raghavachari et al., 2001 ; Sammer et al., 2007).

L'indice TLI (pour *Task Load Index* en anglais) propose un ratio du rythme thêta en région frontale (électrode Fz) sur le rythme alpha en région pariéto-occipitale (électrode Pz). Ce ratio est considéré comme un meilleur indicateur de charge cognitive par rapport à d'autres ratios ou analyses de bandes de fréquences indépendantes (Kamzanova et al., 2014). L'indice du TLI peut être interprété de différentes façons selon le contexte dans lequel il est utilisé. Ainsi, l'indice augmente en fonction de l'exigence de la tâche (Holm et al., 2009). Par exemple, il peut être grand lorsqu'il y a plusieurs conditions à traiter par un participant (Holm et al., 2009). Une charge cognitive importante est associée à une augmentation du TLI (Gevins & Smith, 2003). Au contraire, si la tâche n'est pas complexe, le ratio peut présenter un

effet inverse et être plus élevé lorsque la tâche est moins exigeante (Kamzanova et al., 2014). Le TLI augmente également en fonction du temps passé sur la tâche (Gevins & Smith, 2003 ; Kamzanova et al., 2014). Il permet de refléter un état de vigilance accru pouvant être traduit par une surcharge de l'attention. Finalement, l'état de fatigue du sujet a également un fort impact sur cet indice, le temps d'éveil ou la privation de sommeil influençant considérablement l'indice du ratio TLI. Comme la mesure de la charge cognitive est une mesure indirecte de l'effet négatif du bruit sur les ressources cognitives, traduisant la nécessité d'engager davantage de ressources pour réaliser une tâche puisque un certain nombre d'entre elles sont « consommées » par le bruit, elle doit certainement être réservée à l'analyse des effets du bruit durant des tâches de travail (et non pendant le repos).

Marqueur EEG de la fatigue mentale, du stress et de la vigilance

La fatigue mentale représente un état pouvant survenir lors de la réalisation d'une tâche cognitive longue, fatigante et exigeant une attention soutenue (Boksem, Meijman, & Lorist, 2005). En effet, il a été montré que le bruit pouvait augmenter le niveau de fatigue mentale. Par exemple, la présence d'un bruit de fond dans une classe d'élève (75 dB(A)) a induit une augmentation de la fatigue mentale (Kristiansen et al., 2014). De la même manière, un bruit de trafic routier (88 dB(A)) a provoqué plus de problèmes de concentrations et de fatigue chez des sujets introvertis (Belojević, Slepcevic, & Jakovljevic, 2001). Il a également été montré qu'un bruit répétitif (bruit de métronome) sur une longue période (60 minutes) pouvait générer une fatigue mentale accrue mesurée par magnétoencéphalographie (Ishii et al., 2013).

On peut fréquemment observer une augmentation de la fatigue mentale et une diminution de la vigilance lorsque les performances des sujets diminuent avec le temps passé sur une tâche. Cet effet est appelé en anglais *time-on-task effect* (Fairclough & Venables, 2004 ; Oken, Salinsky, & Elsas, 2006). Cette baisse de la vigilance se traduit par une augmentation progressive de l'activité EEG dans la bande alpha au niveau de la zone pariéto-occipitale (Boksem et al., 2005 ; Gale, Davies, & Smallbone, 1977 ; Klimesch, 1999, 2012 ; Oken et al., 2006 ; Zhao, Zhao, Liu, & Zheng, 2012) et par une diminution de l'amplitude de la bande thêta dans la zone frontale (Başar-Eroglu, Başar, Demiralp, & Schürmann, 1992 ; Boksem et al., 2005 ; Klimesch, 1999, 2012 ; Oken et al., 2006 ; Paus et al., 1997 ; Zhao et al., 2012, 2012). Le niveau attentionnel étant fortement corrélé à la vigilance, la baisse d'activité alpha peut également être associée à un niveau attentionnel plus élevé (van Winsun, Sergeant, & Geuze, 1984 ; Ray & Cole, 1985 ; Pfurtscheller, Stancák Jr., & Neuper, 1996 ; Fink, Grabner, Neuper, & Neubauer, 2005 ; Kamzanova et al.,

2014). Lorsque la fatigue mentale est plus importante, on peut noter une diminution de l'activité haute fréquence de la bande gamma sur les aires frontales (Faber, Maurits, & Lorist, 2012 ; Klimesch, 1999 ; Lal & Craig, 2002 ; Oken et al., 2006 ; Zhao et al., 2012). Ainsi, la fatigue mentale occasionnée par un bruit pourrait être analysée par ce type de mesure.

Le bruit peut également avoir un impact direct sur les ondes cérébrales. Ainsi, Park et al., (2011) ont réalisé une étude de l'effet du stress psychologique, induit par des tâches cognitives (mémorisation d'éléments et calcul mentale) et du stress physique, induit par des bruits intermittents durant les tâches, sur les ondes cérébrales. Les résultats montrent que le stress induit par le bruit génère une diminution significative de la puissance de la bande alpha par rapport au repos dans la zone pariéto-occipitale, alors que le stress induit par les tâches, induisait une augmentation de la puissance dans la bande thêta dans la zone frontale.

Landström et al. (1991) ont réalisé une étude ayant pour but d'évaluer l'effet d'un bruit tonal et d'un bruit tonal masqué par un bruit rose basse fréquence à 41 dB(A). Des mesures subjectives de la gêne et de la fatigue ont été mesurées. Les participants avaient une tâche de reconnaissance d'image à réaliser. De plus, les changements de l'état d'éveil ont été surveillés grâce à des mesures EEG. L'état d'éveil était mesuré grâce à une augmentation des activités des bandes alpha et thêta sur des électrodes occipitales (P4 et O2) durant des périodes yeux ouverts et yeux fermés. Les résultats montrent un état d'éveil plus élevé durant l'exposition au bruit rose comparé au bruit tonal. Cet effet était plus présent durant la réalisation de la tâche de reconnaissance comparée à la période yeux fermés. Les résultats de cette étude montrent qu'un bruit rose masquant un bruit tonal va augmenter les performances à une tâche de reconnaissance et améliorer l'état d'éveil.

La bande gamma peut également être un indicateur du niveau d'attention sélective. Tiitinen et al. (1993) ont réalisé une expérience durant laquelle les sujets écoutaient des séquences de bips sonores dans une oreille tout en ignorant des bips sonores présentés dans l'autre oreille. Les résultats ont montré une augmentation de la bande de fréquence gamma sur l'aire frontale lorsque les sujets portaient attention aux stimuli cibles plutôt qu'à ceux ignorés. Cette augmentation de la puissance de la bande gamma permet d'indiquer si le sujet est attentif aux stimuli auditifs.

L'EEG peut également refléter la valence émotionnelle (caractérisant l'aspect positif ou négatif d'un stimulus) associée à la présentation de bruit. Une étude plus récente (Di, Fan, & Lin, 2018) a exploré l'influence de tonalités intermittentes (125 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1000 Hz et 4000 Hz) sur les bandes fréquentielles de l'EEG. Cette étude a montré que la durée de l'exposition induisait une diminution de la puissance du rythme thêta sur les régions du scalp frontale, temporale et

pariétale. L'amplitude de la bande beta a été influencée par deux paramètres psychoacoustiques : l'acuité et la force de fluctuation des sons. Ces résultats indiquent que le temps d'exposition à des tonalités intermittentes ne laisse pas les participants émotionnellement neutres contrairement au silence (sans toutefois pouvoir déterminer si cette valence était positive ou négative).

De plus, même des sons inaudibles comme les infrasons (< 20 Hz) peuvent avoir un impact sur l'EEG. Kasprzak (2012) a montré que des infrasons d'une fréquence de 7 Hz à 120 dB était la cause d'une diminution de la puissance du rythme alpha dans la région pariéto-occipitale.

1.5.2. Électrocardiographie

1.5.2.1. Fonctionnement de l'ECG

Le cœur est l'organe qui assure la circulation sanguine. Il est divisé en deux parties accolées, chacune divisée en deux cavités (oreillettes et ventricules). Les contractions (systoles) et relâchements (diastoles) cycliques de ces cavités vont permettre de pomper le sang pour le faire circuler dans le corps entier (Goldberger, Goldberger, & Shvilkin, 2017). La dépolarisation, c'est-à-dire la stimulation des cellules musculaires cardiaques provoquant une contraction, va générer un champ électrique positif à l'extérieur du cœur alors que la repolarisation (décontraction) va créer un champ négatif. Des séquences de dépolarisation et de repolarisation vont se succéder afin de pomper le sang dans les différentes cavités du cœur. L'électrocardiographie (ECG) a pour objectif d'enregistrer cette activité électrique grâce à des électrodes posées sur la surface de la peau. La tension électrique du signal recueilli est de l'ordre du millivolt. Le tracé particulier de l'ECG est composé de différents pics positifs et négatifs qui correspondent à des moments bien précis du rythme cardiaque. Ainsi la première dépolarisation correspond à la contraction des oreillettes, elle est appelée onde P (Figure 18). La dépolarisation des ventricules est composée d'une première onde négative Q, suivie d'une onde positive de grande amplitude R puis d'une deuxième onde négative S, ces ondes forment le complexe QRS. Finalement, les ondes T et U sont produites par la repolarisation des ventricules (Goldberger et al., 2017 ; Romanò, 2015). Le rythme cardiaque est mesuré grâce au pic R, que l'on appelle plus communément un battement. Dans un enregistrement ECG continu, chaque complexe QRS est détecté et est associé à un battement cardiaque (Malik et al., 1996).

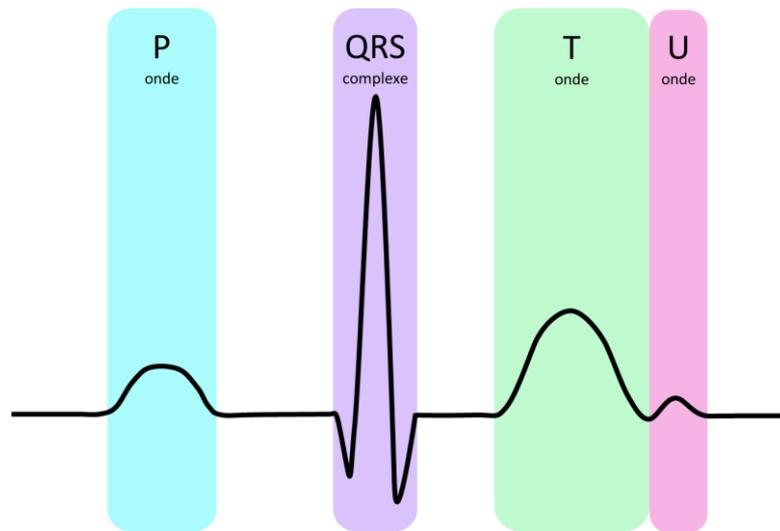


Figure 18 : Représentation d'un ECG normal composé de l'onde P, du complexe QRS et des ondes T et U

Le système nerveux va adapter la quantité de sang en circulation en modulant la puissance et la fréquence des contractions du cœur en fonction des besoins métaboliques de l'organisme. Les différents organes et muscles du corps ont besoin de plus d'oxygène lorsque qu'ils sont actifs plutôt qu'au repos (Goldberger et al., 2017). Il en est de même pour le cerveau, qui est l'organe le plus complexe du corps humain, consommant 20 % de l'énergie disponible (Muoio, Persson, & Sendeski, 2014). L'activité cardiaque donne des indications sur l'activité du cortex préfrontal via l'activité vagale et par conséquent l'activité cognitive (Riese, 1999 ; Thayer et al., 2009). En effet, le système nerveux autonome assure la régulation des processus automatiques du corps, comme la respiration et l'activité cardiaque. Ce dernier, sous l'influence du cerveau, de l'hypothalamus et du bulbe rachidien, va contrôler et réguler la fréquence cardiaque. Le système nerveux orthosympathique va avoir un rôle excitateur sur l'activité cardiaque, alors que le système nerveux parasympathique va avoir un rôle inhibiteur. Ainsi, la régulation de la fréquence cardiaque résulte de l'équilibre des stimulations orthosympathiques et parasympathiques (Lane et al., 2009).

1.5.2.2. Effet du bruit sur l'activité cardiaque

Des études suggèrent qu'une exposition chronique au bruit provoque une activation accrue du système cardiovasculaire (Kryter, 1985). Par exemple, Andrén (1982) a exposé des personnes à des bruits forts (95 ou 100 dB(A)), provoquant une augmentation de la tension artérielle chez les sujets sains ainsi que ceux souffrant d'hypertension. Chez les sujets sains, cette hypertension était principalement due à une augmentation du débit cardiaque. Cette effet sur la tension artérielle se retrouve

dans d'autres études (Laszlo, McRobie, Stansfeld, & Hansell, 2012) et notamment chez les enfants au repos exposés au bruit de façon chronique (Evans & Lepore, 1993). Comme le montre une méta-analyse (van Kempen & Babisch, 2012), l'exposition à du bruit de trafic routier est positivement et significativement associée à l'hypertension. Une autre étude montre que le rythme cardiaque peut être augmenté durant une exposition à un bruit blanc intermittent (90 dB durant quelques secondes) durant une tâche d'activité physique (Finkelman et al., 1979).

On peut également mentionner l'effet de sursaut provoqué par un bruit soudain et stressant, bien connu chez les pilotes suite à l'émission d'une alarme non attendue (Bliss, 1993 ; W. L. Martin, Murray, & Bates, 2012 ; W. L. Martin, Murray, Bates, & Lee, 2016). L'alarme va provoquer une réponse physiologique particulière, avec une augmentation du rythme cardiaque à la survenue d'un son fort (Hatton et al., 1970).

De plus, l'analyse de l'activité cardiaque permet de réaliser une mesure indirecte de l'effet du bruit par la mesure de la charge cognitive. En effet nous l'avons vu dans la partie 1.5.1.4, la charge cognitive peut augmenter en raison du déploiement de processus d'inhibition du bruit (Bidet-Caulet et al., 2010 ; Sabri et al., 2014). De plus, il a été montré que les stratégies de coping face au bruit pouvaient être reflétées par l'activité cardiaque (Robert & Hockey, 1997). L'adaptation au stress lié au bruit entraînerait un coût pour l'organisme, se traduisant par une augmentation du niveau d'éveil et une augmentation du rythme cardiaque (Lundberg & Frankenhaeuser, 1976, 1978). De plus, Hijzen, Van Der Gugten, & Bouter (1984) ont montré que face à un stress élevé induit par du bruit (bruit blanc à 100 dB), un aplatissement de l'onde T de l'ECG était visible, reflétant l'influence du système nerveux sympathique sur l'activité cardiaque.

L'augmentation de la charge cognitive peut être reflétée de différentes manières sur l'ECG. Premièrement on peut observer une augmentation du rythme cardiaque lors de tâches (par exemple la tâche de Stroop) impliquant les capacités de la mémoire de travail et d'inhibition (Boutcher & Boutcher, 2006 ; Hamer, Boutcher, & Boutcher, 2003 ; Stein & Boutcher, 1993) ou encore sur une tâche de calcul mental (Brown, Szabo, & Seraganian, 1988 ; Seraganian, Szabo, & Brown, 1997 ; Sloan, Korten, & Myers, 1991 ; Tomaka, Blascovich, & Swart, 1994).

Une autre métrique de l'activité cardiaque est la variabilité du rythme cardiaque (HRV pour *heart rate variability* en anglais). Cette variabilité représente les différences d'intervalle de temps (intervalle R-R) entre chaque battement consécutif (Malik et al., 1996). Ces intervalles RR sont aussi appelés NN pour *normal-to-normal*, dans ce cas seul les complexes QRS correspondant à une dépolarisation normale sont sélectionnés en excluant les ectopiques (Malik et al., 1996). Des études ont montré que le rythme cardiaque était plus régulier (HRV faible) lors d'une tâche

exigeante contrairement au repos où il est irrégulier (Hansen, Johnsen, & Thayer, 2003 ; Malik et al., 1996). Ainsi, cette métrique permet d'indiquer une charge cognitive plus importante (Fairclough & Venables, 2004 ; Lane et al., 2009 ; Thayer et al., 2009). La variabilité cardiaque peut être analysée de différentes manières. La plus simple est d'analyser l'intervalle de temps entre chaque battement cardiaque (intervalle R-R, appelé IBI pour *inter-beat-interval* en anglais). Une autre mesure de la HRV est l'indice NN50 qui correspond au nombre d'intervalles normaux (NN) dont la différence avec ceux adjacents est supérieure à 50 ms (Clifford, 2002 ; Malik et al., 1996). Hansen et al. (2003) ont analysé un indice de HRV via l'intervalle entre chaque battement cardiaque (IBI) lors d'une tâche de mémoire de travail et d'attention soutenue. Cette étude a montré qu'une HRV élevée était associée à une meilleure performance (plus de bonnes réponses, moins d'erreurs et réponse plus rapide) lors d'une tâche impliquant des fonctions exécutives. De la même manière, une HRV haute a été associée à de meilleures performances en mémoire de travail (Thayer et al., 2009). De manière générale, la HRV et le rythme cardiaque augmentent lors de la réalisation de tâches cognitives comparées au repos (Massaro & Pecchia, 2019).

De plus, il a été montré que le rythme cardiaque et sa variabilité sont des marqueurs sensibles aux processus émotionnels (Brosschot & Thayer, 2003 ; Hidalgo-Muñoz et al., 2018 ; Lane et al., 2009 ; McCraty, Atkinson, Tiller, Rein, & Watkins, 1995 ; Quintana, Guastella, Outhred, Hickie, & Kemp, 2012). Il est admis que le bruit est un stresser psycho-social qui peut affecter le fonctionnement physiologique (Andrén, 1982 ; Babisch, 2003 ; Evans et al., 1995). Or le rythme cardiaque est fortement impacté par le stress (Li et al., 2009 ; Lucini, Di Fede, Parati, & Pagani, 2005 ; Porges, 1995 ; Yeung et al., 1991) et peut donc être un bon indicateur de l'état de stress généré par le bruit. Il a été montré que la fréquence cardiaque et la pression artérielle étaient positivement corrélées à l'exposition au bruit pouvant être nocive pour des travailleurs dans des usines (Lusk et al., 2004), mais également pour des enfants exposés à des bruits de trafic routier (Belojević et al., 2008). De plus, la fréquence cardiaque et sa variabilité peuvent être plus élevées chez les personnes sensibles au bruit (White et al., 2017b).

1.6. EQUATION DE CONFORT D'AIRBUS HELICOPTERS

Le confort acoustique en cabine d'hélicoptère est principalement influencé par le niveau sonore de la boîte de transmission principale et du bruit aérodynamique (Marrot et al., 2011). Pour analyser plus finement le confort acoustique selon le profil de bruit, une équation de confort a été conçue par Airbus Helicopters. Cette équation de confort permet d'analyser le signal sonore et apporte

une évaluation « physique » du son sur des critères qui sont normalement « subjectifs » : la sonie, l'acuité et la tonalité des sons. Ces trois paramètres sont estimés par l'échelle de confort grâce à des équations définies par Zwicker & Fastl (2013). En plus de ces trois dernières métriques, un calcul du niveau en décibel G a été ajouté comme paramètre de l'équation (Marrot et al., 2011). Chaque métrique possède une contribution propre, visible sur la Figure 19. Ces contributions ont été calculées à partir de tests d'écoute subjectifs réalisés en salle expérimentale puis en simulateur de bruit d'hélicoptère (Marrot et al., 2011). Les réponses subjectives associées aux tests d'écoute ont permis de calculer les coefficients (a) à appliquer permettant de pondérer les paramètres de l'équation (d'après Marrot et al., 2011).

$$\text{Index de confort}(x) = a_1 \times \text{Sonicité}(x) + a_2 \times \text{Acuité}(x) + a_3 \times \text{dB}(G)(x) + a_4 \times \text{Tonalité}(x) + a_5 \quad (2)$$

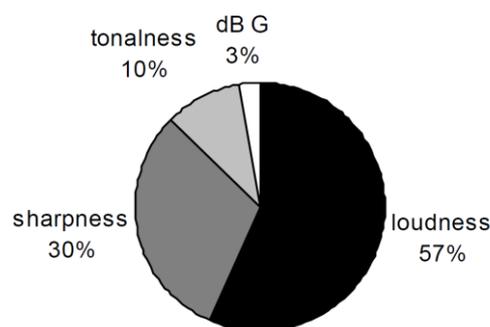


Figure 19 : Contribution des métriques psychoacoustiques à l'équation de confort en cabine développée par Airbus Helicopters (d'après Marrot et al., 2011)

1.7. PRESENTATION DES HYPOTHESES DE LA THESE

L'objectif de cette thèse était de déterminer quelles fréquences d'un bruit d'hélicoptère pouvaient être délétères et impacter les activités d'un passager lors d'un vol en hélicoptère.

La première étape a consisté à définir six conditions sonores qui allaient être évaluées sur des participants. Ces conditions sonores avaient pour but de mettre en évidence les tonalités de la boîte de transmission principale sur lesquelles le contrôleur actif d'Airbus Helicopters est efficace. Ainsi, cinq filtrages différents de ces tonalités ont été créés pour évaluer leurs impacts sur les activités d'un passager. Une condition de silence a également été ajoutée. La seconde étape a été de définir les principales tâches qu'un passager réalise durant un vol. Ainsi les trois activités sélectionnées comme étant les plus représentatives d'un passager de classe *VIP*

étaient de travailler, lire ou se reposer. Afin de simuler ces trois activités des tâches expérimentales ont été implémentées : une tâche de « travail » combinant des capacités de calcul mental et de mémoire de travail, une tâche de « lecture » consistant en la lecture de textes extraits d'un livre et une tâche de « repos » consistant à se détendre en visualisant une vidéo de nuages qui défilent.

Pour pouvoir évaluer l'impact du bruit sur les passagers, des mesures subjectives, comportementales et psychophysiologiques ont été analysées au cours des tâches expérimentales sur des participants volontaires. Afin d'évaluer le ressenti subjectif des participants lors d'expositions au bruit, des questionnaires et tests psychométriques ont été utilisés, notamment, permettant d'évaluer leur niveau de fatigue, la difficulté de réalisation de la tâche cognitive et leur niveau de stress. Les mesures comportementales consistaient à analyser les performances aux tâches impliquant des fonctions cognitives (la tâche de travail et la tâche de lecture). Et pour finir, des mesures électroencéphalographiques (EEG) et électrocardiographiques (ECG) ont été analysées pour évaluer l'impact du bruit sur l'activité cognitive des participants.

Les hypothèses attendues concernant les résultats subjectifs, étaient un niveau de fatigue et de stress plus important après une exposition au bruit d'hélicoptère tonal. Nous nous attendions à une difficulté ressentie plus importante avec les conditions bruyantes qu'en condition silencieuse. Etant donné la corrélation entre le ressenti subjectif et l'impact du bruit sur les performances à des tâches cognitives (développé dans la partie 1.4.8 p.58), des questionnaires permettant de recueillir la perception qu'avaient les sujets des conditions sonores ont été administrés. Le bruit tonal étant particulièrement dérangeant, nous nous attendions à un impact plus important des conditions avec beaucoup de tonalités sur leur perception subjective.

Pour les résultats des tâches cognitives (tâche de « travail » et de « lecture ») nous avons deux hypothèses. La première était qu'en raison de la gêne provoquée par les différentes tonalités du bruit d'hélicoptère, les participants allaient réaliser davantage d'erreurs et avoir des temps de réactions ralentis. Cependant, nous pouvions également nous attendre à ce que les performances cognitives ne soient pas impactées par le bruit, en raison de stratégies d'adaptation au bruit (coping) efficaces.

Nos hypothèses concernant les mesures psychophysiologiques étaient qu'en raison de stratégies de « coping » pour s'adapter au stress généré par le bruit (voir partie 1.4.4 p.54 et partie 1.5.1.4 p.67), la charge cognitive allait être plus importante lors des expositions au bruit (voir partie 1.5.1.4 p.67 et partie 1.5.2.2 p.72). Nous supposons également que les bruits avec le plus de tonalités allaient être plus délétères sur la charge cognitive que les bruits filtrés. Concernant les résultats EEG,

les résultats pouvant être attendus étaient une augmentation de la puissance du rythme thêta sur la région frontale, pouvant se traduire par une charge cognitive élevée ou un stress plus important. Une diminution pouvait également être attendue dans le cas d'une fatigue mentale plus importante ou un état d'éveil réduit. Une diminution de la puissance du rythme alpha est attendu sur la région pariéto-occipitale pouvant refléter une charge cognitive élevée et un niveau attentionnel élevé. L'effet inverse était également possible, c'est-à-dire une augmentation de la bande alpha pouvant être traduite par une baisse de vigilance, une fatigue mentale accrue ainsi qu'un stress plus important. Une diminution de la puissance de la bande gamma était attendue en raison d'une fatigue mentale plus importante suite à l'exposition au bruit. Cependant, une augmentation de la puissance de la bande gamma sur la région frontale était également prévisible lorsque les participants allaient s'attarder et être plus attentifs aux stimulations sonores. Pour finir, l'indice TLI était espéré plus élevé dans les cas où la charge cognitive était plus importante et lorsque la tâche était perçue plus exigeante. De plus, cet indice était supposé augmenter en fonction du temps pour traduire une fatigue mentale accrue.

Concernant l'activité cardiaque, une augmentation du rythme cardiaque était attendue en raison du stress généré par l'exposition au bruit. De même que pour les résultats attendus sur l'EEG, nous nous attendions à une augmentation de la charge cognitive suite à des stratégies de compensation (coping) pouvant se refléter par une augmentation du rythme cardiaque et par une variabilité (HRV) plus faible.

Pour la tâche de repos, nous nous attendions à un état moins détendu en présence de bruit tonal, ce résultat pouvant se traduire par une diminution du rythme EEG alpha dans les régions pariéto-occipitales.

Etant donné la forte corrélation entre la personnalité et la gêne ressentie d'un bruit (développé dans la partie 1.4.6 p.62), nous avons administré des tests de personnalité et de sensibilité aux bruits aux participants. Notre hypothèse était que les personnes introverties et sensibles au bruit allaient être plus dérangées par les conditions avec un bruit d'hélicoptère. Cette gêne allait se traduire par une évaluation du bruit plus sévère comparée aux personnes extraverties et peu sensibles au bruit. Des performances cognitives diminuées étaient également attendues lors de la tâche de « travail » et de « lecture ». Concernant la tâche de repos, nous supposons que ce groupe de personnes allait être moins détendu lors des expositions au bruit.

Etant donné le caractère particulièrement délétère des sons fluctuants mis en évidence dans la littérature (partie 1.4.5 p. 55), nous avons mené une expérience complémentaire afin tester l'effet d'un tel bruit sur les performances cognitives. Nous avons également voulu investiguer un autre aspect de la cognition : la vigilance, qui est positivement impactée par le bruit (effet excitateur). Nous nous

attendions à des performances améliorées sous l'effet du bruit pour la tâche de vigilance et des performances impactées par le bruit pour les autres tâches cognitives (travail et lecture).

2. METHODOLOGIE

Dans ce chapitre, les protocoles expérimentaux des quatre expériences réalisées au cours de cette thèse seront présentés.

2.1. MATERIEL

2.1.1. Salle expérimentale

Les trois premières expériences (travail, lecture et repos) ont été réalisées dans une maquette de cabine d'hélicoptère dénommée VASCO, reproduisant un tiers de la cabine d'un NH90 (hélicoptère de transport pour le marché militaire ; voir Figure 20). L'intérêt est de faciliter l'immersion et d'augmenter le sentiment de présence durant les expériences. En effet, le contexte peut moduler la perception subjective, par exemple lorsqu'il existe une incongruence entre environnement visuel et auditif (Iachini et al., 2012 ; Ruotolo et al., 2012 ; Viollon, Lavandier, & Drake, 2002). De plus, nous ne voulions pas réaliser l'expérience dans une chambre anéchoïque qui aurait instaurée une privation sensorielle pouvant engendrer des hallucinations et des vertiges (Mason & Brady, 2009). Le niveau global de bruit de fond à l'intérieur du tronçon était faible, autour 33 dB(A), soit bien inférieur au niveau des signaux générés.



Figure 20 : Tronçon d'hélicoptère VASCO de l'ONERA Toulouse avec le dispositif expérimental. A gauche est présenté une vue extérieure du tronçon. A droite, une vue intérieure avec le bureau sur lequel les participants réalisaient les expériences.

Par convenance, l'étude complémentaire a été réalisée dans une simple salle expérimentale et était donc moins immersive que les autres études.

Un écran 19 pouces (résolution de 1280 x 1024 pixels), un clavier et une souris étaient placés en face du participant, dans la cabine sur un bureau et reliés à un ordinateur équipé de Windows 7. L'ordinateur était placé à l'extérieur de la cabine et contrôlé par l'expérimentateur. Pour la tâche de travail (TNT), les participants répondaient à l'aide d'un boîtier de réponse Cedrus (RB-740, Cedrus Corporation, Sand Pedro, CA). Ce boîtier comprend 7 boutons alignés horizontalement dont le bouton le plus à gauche est un bouton rouge et le bouton le plus à droite est un bouton vert.

2.1.2. Outils de mesure physiologique et oculométrique

L'électroencéphalogramme et l'électrocardiogramme ont été enregistrés grâce à un système d'acquisition Biosemi *ActiveTwo* intégrant un boîtier d'acquisition (A/D-box) amplificateur sur lequel étaient branchées les électrodes.

L'amplificateur est ensuite connecté par fibre optique à un récepteur USB 2.0, permettant l'enregistrement des données sur l'ordinateur.

64 électrodes Ag/AgCl actives (c'est-à-dire pré-amplifiées) ont été utilisées et positionnées selon le système international 10-20 (Figure 21). Deux électrodes supplémentaires placées près de Pz ont été utilisées : l'électrode active *Common Mode Sense* (CMS) et l'électrode passive *Driven Right Leg* (DRL). Elles permettent de déterminer le potentiel électrique moyen de chaque participant. L'impédance obtenue grâce aux électrodes CMS et DRL était systématiquement maintenue en dessous de 20 k Ω pour chaque électrode. Les données ont été enregistrées à une fréquence d'échantillonnage de 512 Hz. Deux électrodes externes ont été placées sur les mastoïdes pour initialement servir d'électrodes de référence, mais elles n'ont pas été utilisées par la suite. Deux électrodes externes supplémentaires ont été utilisées afin de recueillir l'activité cardiaque : une première électrode était placée sous la clavicule droite et une deuxième sur la ligne médio-axillaire (côtes) gauche (Figure 22).

Le logiciel utilisé pour visualiser et enregistrer les données EEG et ECG était Actiview©. Un boîtier Neurospec de communication entre le port parallèle du Biosemi et le port USB de l'ordinateur a été utilisé. Cette étape a permis de synchroniser les marqueurs des évènements de la tâche avec l'activité physiologique sur Actiview.

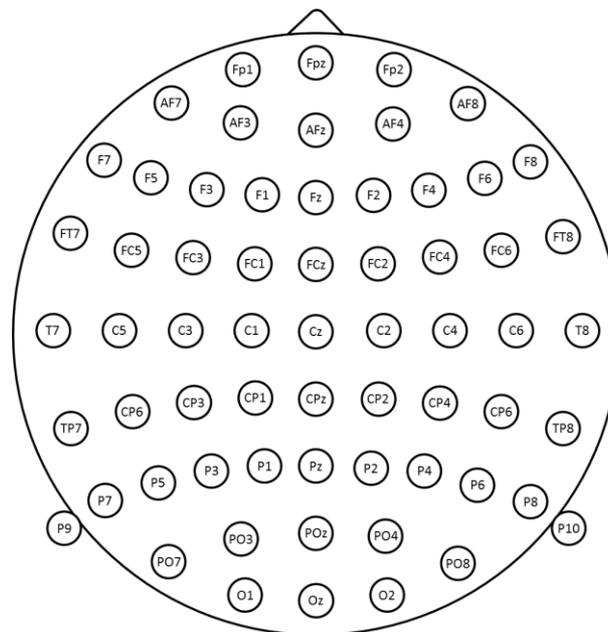


Figure 21 : Placement des 64 électrodes du BioSemi selon le système international 10-20

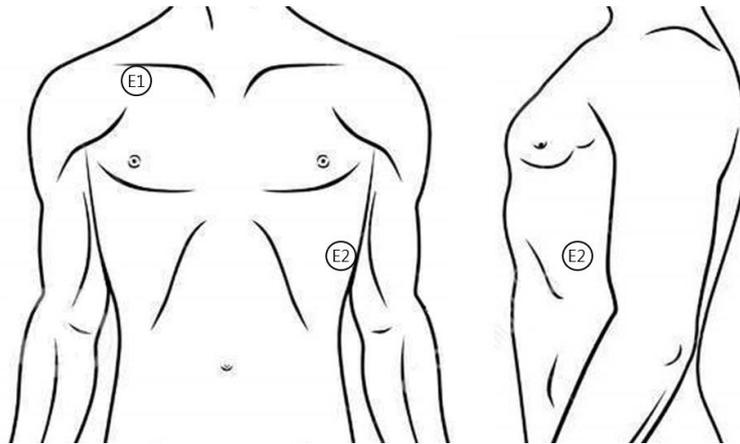


Figure 22: Placement des deux électrodes externes pour la mesure de l'activité cardiaque. E1 : électrode clavicule droite ; E2 : électrode ligne médio-axillaire gauche.

L'oculométrie est une technique d'enregistrement des mouvements des yeux qui consiste à repérer en temps réel la position du regard au moyen d'un détecteur optique ou d'une caméra émettant un rayon infrarouge envoyé sur la cornée oculaire. Les données oculométriques ont été enregistrées à l'aide d'une barre GazePoint© GP3 à une fréquence d'échantillonnage de 60 Hz. Le logiciel utilisé pour l'enregistrement des données était le LSL (*Lab Streaming Layer*) afin de synchroniser les informations générées par la tâche de lecture (début et fin de la tâche) et les données oculaires. Ces données étaient ensuite sauvegardées sous le format xdf.

2.1.3. Restitution sonore

2.1.3.1. Choix du casque audio

Pour reproduire l'environnement acoustique d'une cabine d'hélicoptère, nous avons choisi d'utiliser un casque audio. Pour obtenir un rendu plus naturel, nous avons opté pour un casque ouvert, c'est-à-dire qui permet à la membrane du haut-parleur d'être libre de ses mouvements et de ne pas générer de résonances sur certaines fréquences. Ces casques sont réputés pour leur fidélité acoustique car contrairement aux casques fermés, il n'y a pas de mise en pression dans la cavité par l'air emprisonné. Un autre critère à prendre en compte dans le choix du casque a été la position circum-aural (coussinet autour de l'oreille et non sur l'oreille) afin d'améliorer le confort. Notre choix s'est finalement porté sur le casque AKG K812 (Figure 23) qui possède une bande passante allant de 5 à 54000 Hz et une efficacité de 110 dB(SPL).



Figure 23 : Illustration du casque AKG K812 sur son support avec un microphone intégré.

2.1.3.2. Choix du support pour les mesures de réponses fréquentielles

Une première étape consiste à mesurer les réponses fréquentielles du casque. Cette étape permet d'évaluer sa restitution sonore, c'est-à-dire la différence entre le signal d'entrée et le signal de sortie. L'estimation des réponses fréquentielles permet par la suite de réaliser une fonction de transfert appliquée aux sons envoyés au casque pour avoir un rendu le plus fidèle possible au signal d'origine.

Pour mesurer la réponse fréquentielle du casque, nous avons dû déterminer quel support utiliser afin d'identifier quelle matière privilégier. Pour cela, des tests sur différents supports ont été réalisés. Nous avons dans un premier temps utilisé le support en bois fourni lors de l'achat du casque. Nous avons réalisé des trous sur celui-ci pour pouvoir brancher un microphone affleurant à la paroi (Figure 24). Nous avons dans un deuxième temps utilisé le support en bois sur lequel nous avons posé une forme simulant une oreille (Figure 25) afin de voir quel est l'effet d'une surépaisseur dans la cavité de l'oreillette du casque. Nous avons enfin utilisé un support en mousse de mélamine de 10 centimètres d'épaisseur (Figure 26).



Figure 24 : Support en bois avec microphone intégré

Figure 25 : Support en bois avec oreille simulée en pâte avec microphone intégré

Figure 26 : Support en mousse avec microphone intégré

Pour évaluer la réponse fréquentielle du casque, un bruit blanc a été produit grâce à un générateur sur Signal Express. Le bruit blanc a été lancé via un amplificateur (Pioneer Stereo Amplifier A-119) qui a transmis le signal jusqu'au casque audio (Figure 27). Un microphone Brüel & Kjær (référence 4939) était installé dans les différents supports (Figure 24 ; Figure 25 ; Figure 26) pour enregistrer le signal de sortie du casque. Deux enregistrements avec des positions différentes du microphone dans le casque ont été réalisés pour chaque support pour lesquels la moyenne a été analysée. Deux enregistrements étaient nécessaires en raison des fluctuations observées en fonction de la position du microphone. Ce point-là sera développé dans la partie 2.1.3.3.

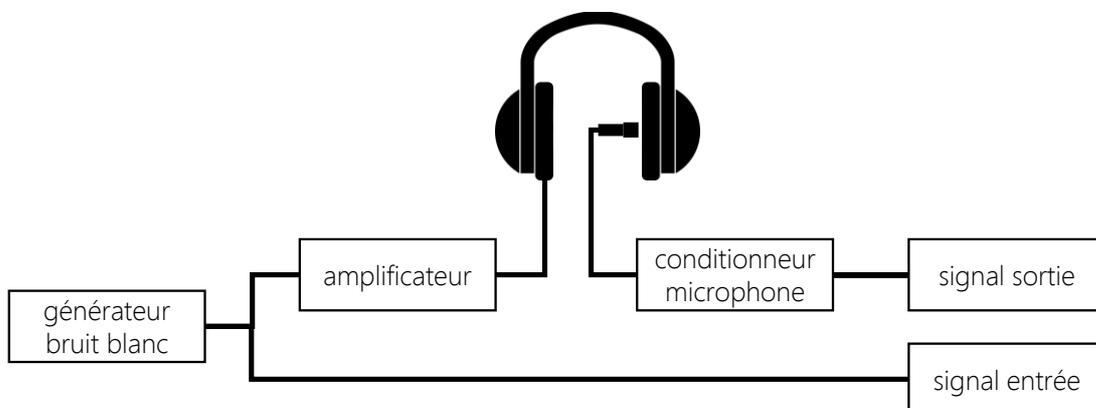


Figure 27 : Schéma du montage pour le calcul de la fonction de transfert du casque audio

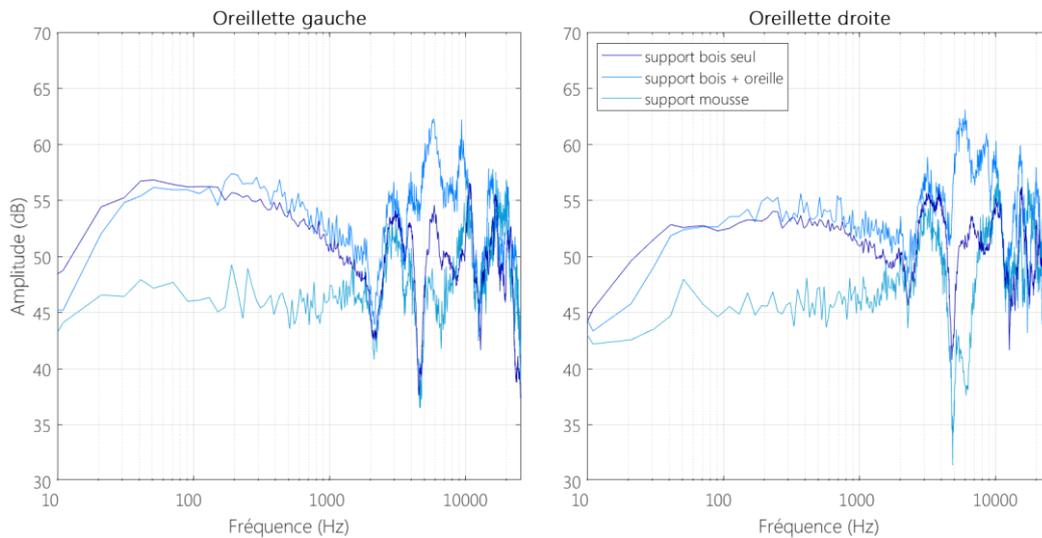


Figure 28 : Spectre de fréquence des enregistrements microphones des différents supports : en bois, en bois avec une oreille et en mousse

Les résultats montrent qu'il n'y a qu'une faible différence entre les signaux de sortie avec le support en bois et avec le support en bois avec oreille sur les basses fréquences, jusqu'à environ 4500 Hz. Le support en mousse apporte une absorption du bruit plus importante sur les basses fréquences. Une chute d'amplitude est remarquable autour des fréquences allant de 4500 à 5000 Hz sur les deux oreillettes du casque sur les deux supports sans oreille. Cette baisse d'amplitude pourrait être due à des ondes destructives en raison de la taille de la cavité. En effet, la cavité du casque mesure 7 cm de diamètre et jusqu'à 4 cm de profondeur. Or d'après la relation entre longueur d'onde et fréquence, il y a coïncidence entre le diamètre et la longueur d'onde à 4757 Hz pour $c=340$ m/s. Il y a donc potentiellement une variation importante du signal de pression au sein de la cavité à partir de cette fréquence. Cela pourrait expliquer la chute d'amplitude entre 4500 et 5000 Hz.

Néanmoins, pour le calcul de la fonction de transfert, nous avons privilégié le support en bois seul, malgré l'effet potentiel de la paroi réfléchissante. En effet, nous avons jugé que le support en mousse était trop absorbant et peu réaliste par rapport à l'absorption d'une tête humaine. De plus, l'oreille modélisée n'étant pas représentative de la diversité des oreilles des participants (en forme et volume), le résultat du calcul de la fonction de transfert sur ce volume, alors que non présent en réalité, aurait pu être biaisé. Ainsi, le support en bois s'est révélé être le support le plus neutre pour notre calcul.

2.1.3.3. Mesures des réponses fréquentielles du casque

La fonction de transfert (FT) permet de déterminer le rapport de l'amplitude de sortie par rapport à celle d'entrée. Elle permet également de déterminer le déphasage entre la tension de sortie et la tension d'entrée. Pour obtenir cette fonction de transfert, un ratio (équation (3)) de l'interspectre du signal de sortie et du signal d'entrée sur l'autospectre du signal d'entrée a été réalisé.

$$FT = \frac{\hat{S}_{yx}}{\hat{S}_{xx}} \quad (3)$$

Avec S_{yx} = l'interspectre du signal de sortie (y) et du signal d'entrée (x) ; S_{xx} = l'autospectre du signal d'entrée (x) signal en entrée. L'application de cette fonction de transfert est ensuite décrite dans la partie 2.2.2.3, p.96.

Sur les premiers enregistrements visant à choisir le support du microphone, les spectres de fréquences montraient une chute de l'amplitude autour de 4500 Hz sur les essais sans oreille dans la cavité. Nous avons donc réalisé plusieurs enregistrements selon différents emplacements du microphone dans le casque (Figure 29), pour vérifier si l'effet d'ondes destructives était toujours présent selon différentes positions. De ce fait, 16 positions ont été testées sur chaque oreillette afin d'avoir une représentation globale de leurs cavités.

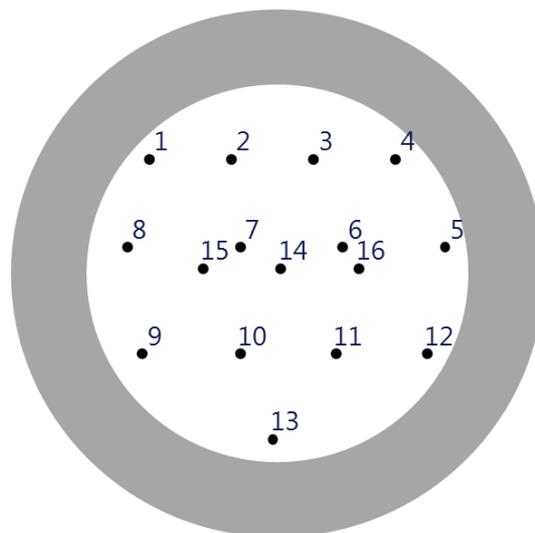


Figure 29 : Positions approximatives des microphones dans chaque oreillette du casque

Les spectres de la fonction de transfert obtenus grâce aux enregistrements (Figure 30) montrent que les signaux sont très fluctuants au-delà de 4500 Hz selon la position du microphone. La chute de cohérence (Figure 31) à partir de 4500 Hz corrobore cette fluctuation. Plus précisément, en dessous de 20 Hz et au-dessus de 4546 Hz, les signaux présentaient une variabilité trop importante pour pouvoir réaliser une fonction de transfert. Ces enregistrements ne permettaient donc pas de définir le signal exact en sortie du casque. Nous avons donc décidé de réaliser cette fonction de transfert uniquement sur les fréquences stables, soit entre 20 et 4546 Hz et de ne présenter ensuite les conditions sonores que sur cette bande de fréquence.

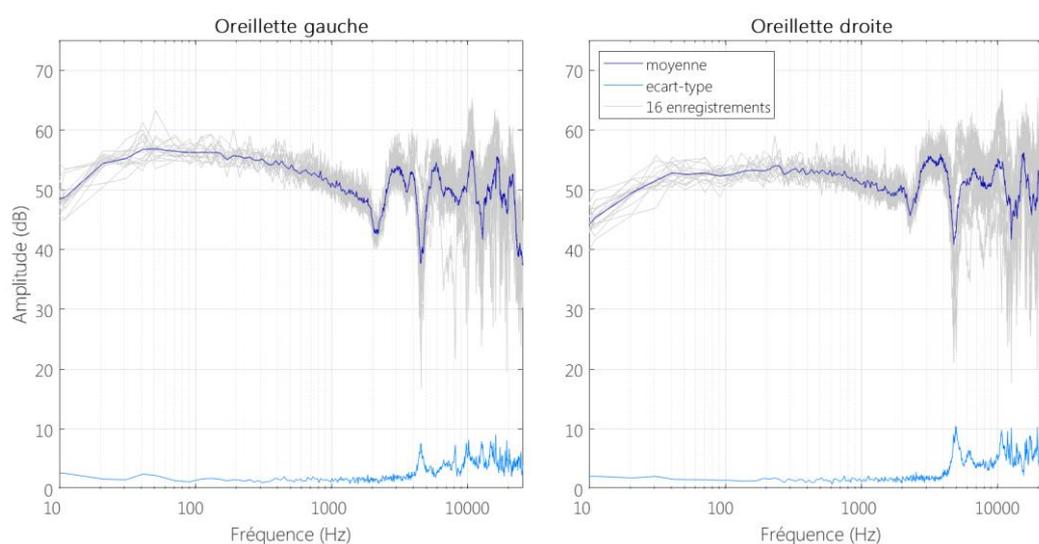


Figure 30 : Fonction de transfert des 16 enregistrements réalisés sur chaque oreillette du casque avec différentes positions du microphone. Les tracés en gris représentent les enregistrements sur les 16 positions du microphone (voir Figure 29). Les tracés bleu foncé représentent les moyennes des enregistrements. Les tracés bleu clair représentent l'écart-type des enregistrements.

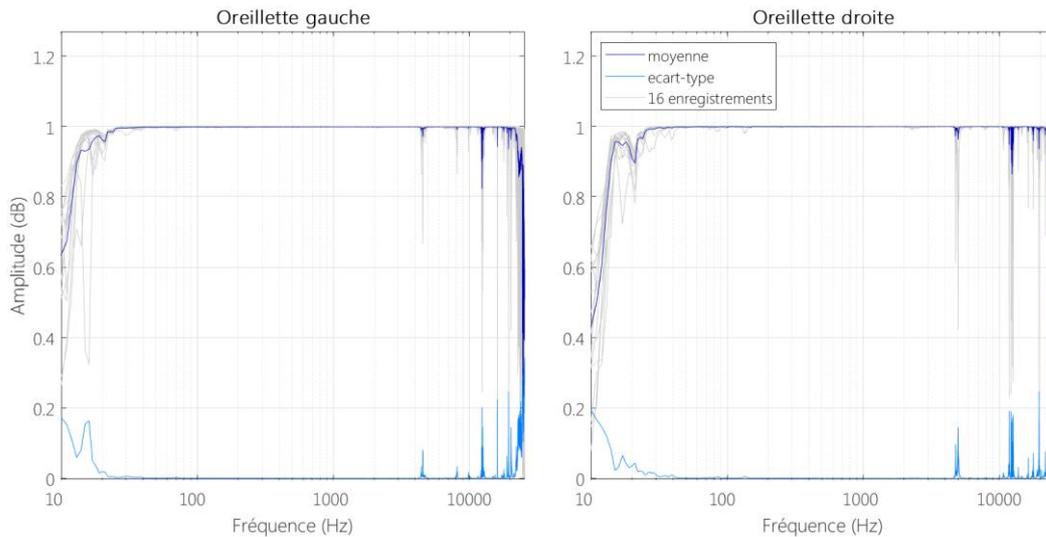


Figure 31 : Cohérence des 16 enregistrements réalisés sur chaque oreillette du casque avec différentes positions du microphone. Les tracés en gris représentent les enregistrements sur les 16 positions du microphone (voir Figure 29). Les tracés bleu foncé représentent les moyennes des enregistrements. Les tracés bleu clair représentent l'écart-type des enregistrements.

2.1.3.4. Diffusion des sons jusqu'au casque

L'émission des sons jusqu'au casque audio a été réalisée de manière binaurale en raison des fonctions de transfert qui sont propres à chaque oreillette. Pour cela, nous avons utilisé une carte d'émission National Instrument (NI cDAQ-9263) afin de restituer le plus fidèlement possible les sons, en s'affranchissant des possibles filtres d'une carte son d'un ordinateur expérimental classique.

Les signaux ont d'abord été chargés, puis ont été envoyés sur deux voies distinctes de la carte son (Figure 32). La carte son possédait deux voies de sorties qui étaient reliées aux deux entrées de l'amplificateur, correspondantes aux oreilles gauche et droite. L'amplificateur a permis d'assembler les deux signaux pour n'obtenir qu'une seule sortie binaurale. Le casque audio était finalement relié à l'amplificateur via une prise jack de 6,35 mm.

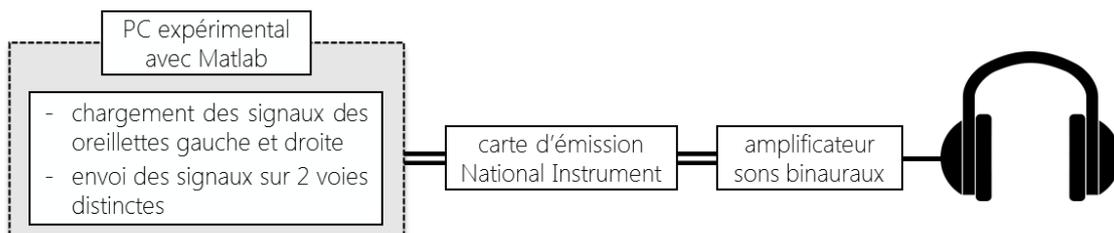


Figure 32 : Schéma du montage d'envoi des signaux des oreillettes gauche et droite au casque audio

2.2. METHODE

2.2.1. Participants

Un résumé démographique des participants ayant participé aux différentes expériences est présenté dans le Tableau 2. Pour éviter tout biais, des groupes indépendants de participants ont été sélectionnés pour chaque expérience. Nous nous sommes restreints à des sujets jeunes (18-35 ans) afin de s'assurer de la bonne audition des participants. Seuls six participants sur 71 ont déclaré une perte auditive de plus de 25 dB sur des fréquences de plus de 6000 Hz, tous les autres avaient une audition normale (Figure 33). De plus, cette tranche d'âge permet d'obtenir un meilleur ratio signal sur bruit de l'EEG.

Aucun des participants n'a signalé d'antécédents de troubles neurologiques ou cardiaques. Tous les sujets ont donné leur consentement éclairé par écrit conformément à la Déclaration d'Helsinki. Cette étude a été réalisée conformément aux recommandations du CERNI n° 2017-042, délivré par le comité d'éthique de la recherche de l'Université de Toulouse (Annexe 1, p.222).

Tableau 2 : Statistiques démographiques des participants ayant pris part à une des quatre expériences

	Nombre de participants	Age (année)	Nombre de femmes	Nombre de gauchers	Niveau d'étude (bac + année)	Nombre d'introvertis	Nombre d'extravertis
TNT	20	26 ± 2	2	2	6 ± 2	6	12
Lecture	20	25 ± 2	8	1	5 ± 2	3	14
Repos	17	29 ± 5	6	2	5 ± 2	7	10
Etude complémentaire	14	27 ± 5	4	1	5 ± 2	6	8

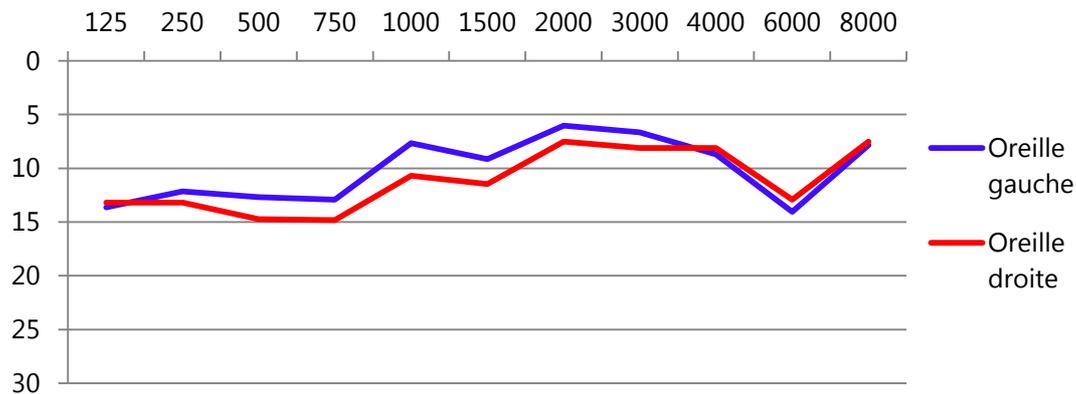


Figure 33 : Audiogramme moyen de tous les sujets

2.2.2. Conditions sonores

2.2.2.1. Signal d'origine

Le signal d'origine provient d'un hélicoptère Airbus Helicopters en version *VIP*. Ce type d'hélicoptère a pour cible le transport d'affaires et de personnalités, donc un traitement acoustique plus poussé a été réalisé pour obtenir un confort plus important. Parmi les trois signaux mis à disposition par Airbus Helicopters, nous avons choisi celui qui présentait le plus de raies dues à la boîte de transmission principale. Le signal a été enregistré en vol réel grâce à un micro positionné à hauteur de tête de passager dans une cabine d'hélicoptère. L'hélicoptère se trouvait dans une phase de vol d'avancement en palier stabilisé autour de 140-145 nœuds. Cette phase de vol est la plus représentative de l'utilisation des hélicoptères par les passagers *VIP* car c'est la phase la plus longue durant laquelle les passagers réalisent des activités. La fréquence d'échantillonnage du signal était de 48 kHz et le niveau sonore de 84 dB(A).

2.2.2.2. Choix des conditions sonores

Nous avons défini plusieurs conditions sonores afin d'évaluer leurs impacts respectifs sur la capacité à réaliser une tâche de travail, à lire et à se détendre.

L'objectif des conditions sonores était de mettre en évidence l'effet des tonalités de la boîte de transmission principale. En effet, le contrôleur actif utilisé par Airbus Helicopters focalise le filtrage sur les tonalités émergentes. Ainsi, nous voulions développer des filtres de sorte à recréer le résultat obtenu par un algorithme de filtrage multi-tonalités. Le filtrage n'était donc pas réalisé en temps

réel comme c'est le cas avec le contrôleur actif. Les signaux obtenus étaient réalisés en amont des expériences pour obtenir un filtrage pouvant être réalisé par un contrôleur actif et ayant des résultats équivalents.

Pour cela, nous avons défini six conditions sonores. La première condition correspondait au bruit d'hélicoptère non modifié (brut). Quatre conditions ont été obtenues à partir du bruit original modifié par quatre filtres différents. Et pour finir une condition silencieuse a été testée. Le contrôle actif est réalisé sur une bande de fréquence s'étalant de 500 à 3000 Hz. Cette bande de fréquence permet de cibler les principales tonalités de la boîte de transmission principale. C'est sur ces dernières, au nombre de dix, que le filtrage des conditions sonores s'est porté.

2.2.2.2.1. Son 1 : bruit brut

La première condition sonore était le bruit brut (non modifié), c'est-à-dire, le bruit d'hélicoptère initial large bande. Ce bruit a été émis dans le casque à un niveau de 84 dB(A), correspondant approximativement au niveau sonore dans la cabine d'hélicoptère. Ce bruit est celui présentant le plus de composantes tonales.

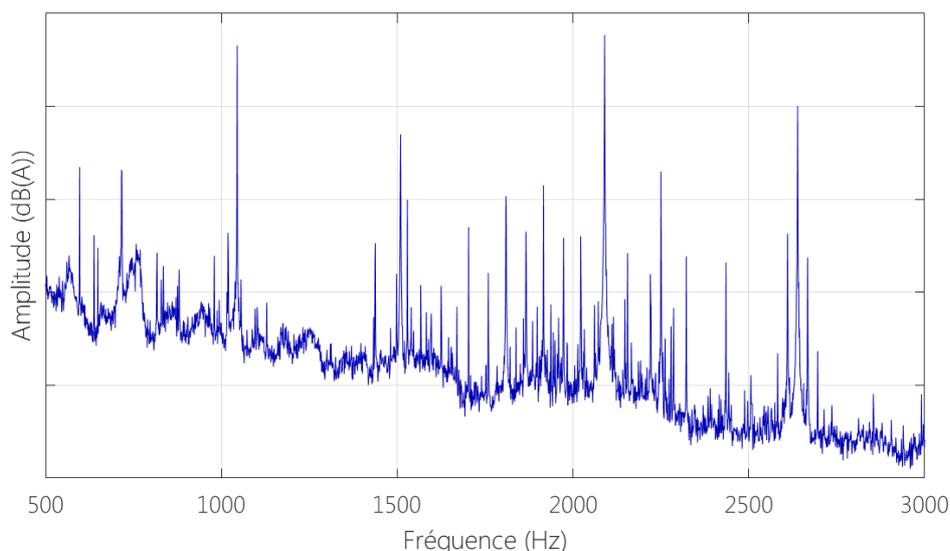


Figure 34 : Spectre fréquentiel du bruit brut sur la bande de fréquence 500-3000 Hz.

2.2.2.2.2. Son 2 : bruit filtré tonalités

La deuxième condition sonore était basée sur le bruit brut original sur lequel ont été filtrées les tonalités émergentes dans la bande de fréquence 500-3000 Hz. Ces tonalités ont été filtrées de sorte à reproduire celui d'un contrôleur actif avec un algorithme multi-tonalité. Pour obtenir cet effet, un filtre coupe-bande Butterworth a été appliqué pour isoler et supprimer les tonalités émergentes (le script Matlab du

filtre avec ses caractéristiques sont disponibles en Annexe 2, Figure 127, p.223). Ce bruit présentait une diminution de 3,5 dB(A) par rapport au bruit brut.

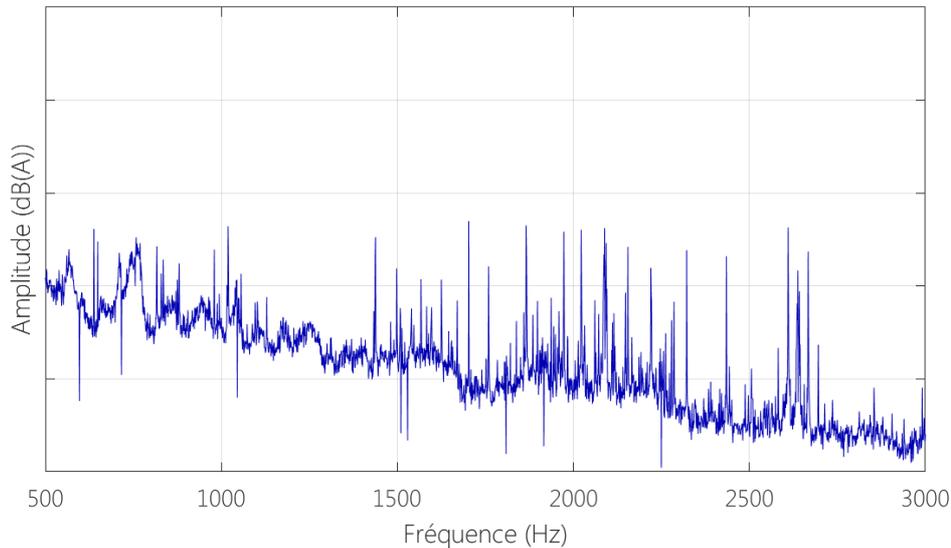


Figure 35 : Spectre fréquentiel du bruit filtré sur toutes les tonalités.

2.2.2.2.3. Son 3 : bruit filtré hautes fréquences

La troisième condition sonore était basée sur le bruit brut original sur lequel les tonalités hautes fréquences comprises entre 1500 et 3000 Hz ont été filtrées. L'objectif de cette condition était d'évaluer l'impact des tonalités basses fréquences. Pour obtenir ce filtre, un filtre coupe-bande Butterworth (Annexe 2, Figure 127, p.223) a été appliqué sur les cinq plus hautes raies émergentes comprises entre 500 et 3000 Hz. Ce bruit correspondait à une réduction de 1,7 dB(A) par rapport au bruit brut.

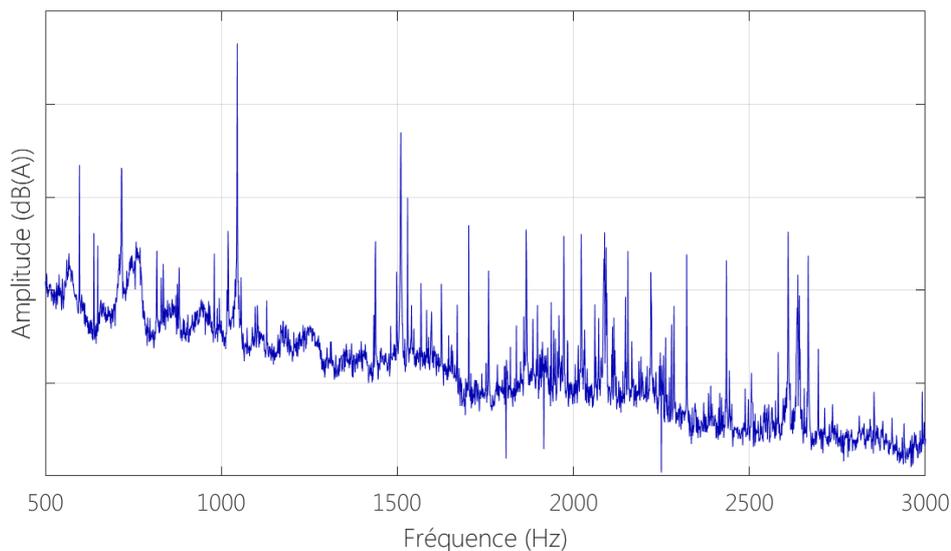


Figure 36 : Spectre fréquentiel du bruit filtré hautes fréquences.

2.2.2.2.4. Son 4 : bruit filtré basses fréquences

La quatrième condition sonore était basée sur le bruit brut original sur lequel les tonalités basses fréquences comprises entre 500 et 1500 Hz ont été filtrées. De la même manière que la condition précédente, celle-ci permet d'analyser l'effet des hautes fréquences restantes. Pour cela, un filtre coupe-bande Butterworth (Annexe 2, Figure 127, p.223) a été appliqué sur les cinq plus basses raies émergentes comprises entre 500 et 3000 Hz. Ce bruit correspondait à une réduction de 1,1 dB(A) par rapport au bruit brut.

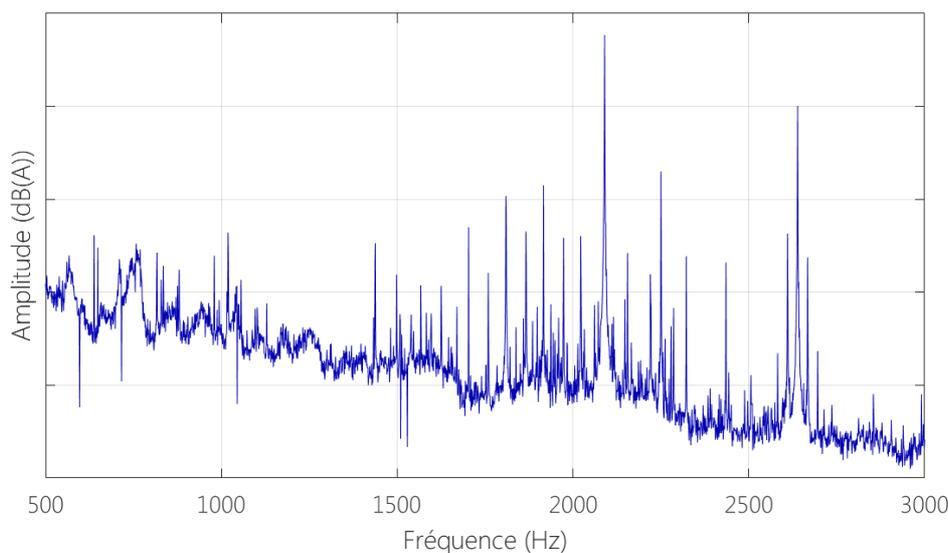


Figure 37 : Spectre fréquentiel du bruit filtré basses fréquences.

2.2.2.2.5. Son 5 : filtre isophonique

La cinquième condition a été filtré isophoniquement, c'est-à-dire qu'un filtre de pondération A a été appliqué sur les tonalités d'intérêts pour leur donner la même sensation d'intensité sonore. Ainsi de cette manière, l'oreille humaine entendra avec la même intensité chacune des tonalités, qui ne seront plus perçues comme émergentes. Pour obtenir ce résultat, sur la base du bruit brut, les tonalités émergentes comprises entre 500 et 3000 Hz ont été isolées à l'aide d'un filtre passe-bande elliptique (le script Matlab du filtre avec ses caractéristiques sont disponibles en Annexe 2, Figure 128, p.223). Sur chacune de ces raies, un filtre appliquant la courbe de pondération A a été réalisé individuellement. Puis les raies ont été réintégrées dans le signal filtré sur toutes les tonalités (son 2). Ce bruit correspondait à une diminution de 3,3 dB(A) par rapport au bruit brut.

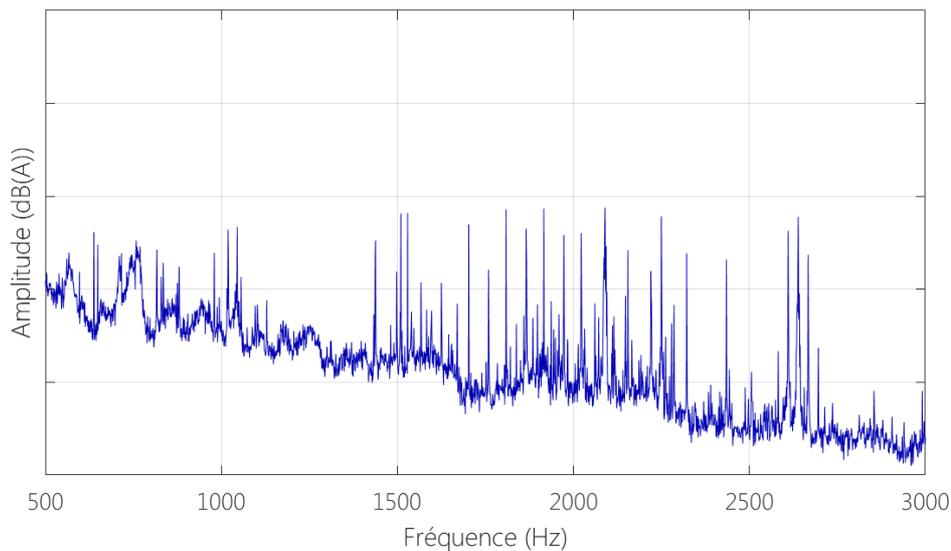


Figure 38 : Spectre fréquentiel du bruit filtré isophoniquement.

2.2.2.2.6. Condition silencieuse

Finalement, la dernière condition, en silence, était une condition contrôle, qui a permis d'évaluer les performances de bases des participants sans aucun bruit. Les participants portaient le casque audio également durant cette condition.

2.2.2.3. Application de la fonction de transfert

La fonction de transfert a été obtenue en moyennant les 16 enregistrements des spectres de phase et d'amplitude de chaque oreillette du casque précédemment établis (Partie 2.1.3.3). Néanmoins, cette dernière n'a été réalisée qu'avec une fréquence d'échantillonnage de 1 Hz. Nous avons dû interpoler des points pour obtenir une fréquence d'échantillonnage égale à celle du signal d'origine qui est de 48000 Hz. Pour pouvoir interpoler ce signal, nous n'avons conservé que 30 secondes du signal original afin d'obtenir des calculs d'interpolation avec des nombres entiers (\mathbb{N}). La fonction Matlab qui a été utilisée est la fonction *pchip* qui permet une interpolation cubique (l'interpolation va relier des points en suivant une fonction cubique et non linéaire, Figure 39). Grâce à cette étape, nous avons obtenu une fonction de transfert sur la bande de fréquence de 20 à 4546 Hz avec une fréquence d'échantillonnage de 48000 Hz.

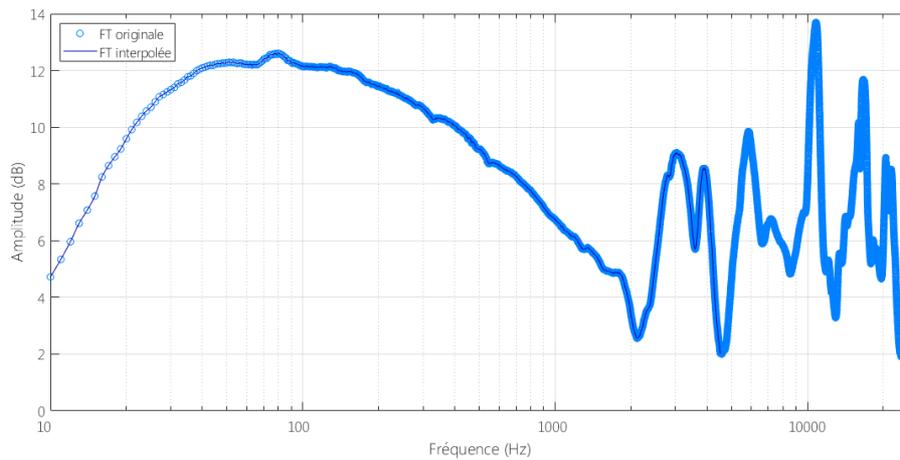


Figure 39 : Interpolation cubique de la fonction de transfert

L'étape suivante a été de calculer la partie fréquentielle (FFT) du signal de sortie (c'est-à-dire le signal que nous avons envoyé au casque audio) grâce à la fonction de transfert et le signal original. Pour cela, un signal composé de zéro a été créé afin d'obtenir le nombre de points souhaité égal au signal d'origine. Puis il a été complété par la fonction de transfert grâce à l'équation suivante :

$$\forall f \in [20; 4546]; FFT_y(f) = \frac{A_x \times e^{i\varphi_x(f)}}{A_{FT} \times e^{i\varphi_{FT}(f)}} \quad (4)$$

Il s'agit de l'équation du calcul du signal de sortie, i.e., sur lequel on a appliqué la fonction de transfert. Avec x = signal en entrée ; y = signal en sortie ; A = amplitude ; φ = phase.

Il suffisait ensuite de faire une FFT inverse symétrique pour obtenir le signal sur lequel était appliquée la fonction de transfert.

A cette étape nous nous retrouvons avec deux signaux pour chaque condition sonore, correspondant pour l'un à celui de l'oreille gauche et pour l'autre à celui de l'oreille droite.

2.2.2.4. Allongement des sons

Nous souhaitons réaliser une exposition de chaque son supérieure à 5 minutes. Le signal d'origine du bruit d'hélicoptère faisant un peu plus de 30s, il était donc nécessaire de le rallonger, ainsi que les autres conditions sonores basées sur celui-ci. En concaténant simplement les signaux les uns après les autres, la transition (la jonction au moment de la répétition du son) était trop importante et se faisait entendre par un « saut » de pression. Pour atténuer ce « saut » et rendre la

transition plus douce, nous avons décidé de faire un fondu enchaîné (appelé *cross-fading* en anglais). Pour cela, l'amplitude du premier signal est progressivement diminuée puis il est superposé au deuxième signal dont l'amplitude augmente progressivement également (Figure 40).

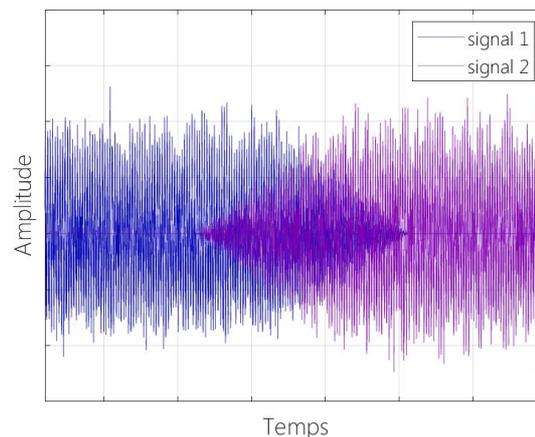


Figure 40 : Exemple de deux signaux superposés grâce à la méthode du fondu enchaîné

2.2.3. Présentation/Choix des tâches

Pour pouvoir évaluer l'impact du bruit d'hélicoptère sur les activités d'un passager, nous devons d'abord définir les principales tâches qu'il réalise durant un vol. Nous avons imaginé que les trois activités les plus représentatives d'un passager de classe VIP durant un vol étaient de travailler, lire ou se reposer. Afin d'évaluer l'impact du bruit sur ces activités, il était nécessaire de sélectionner des tâches qui les simulent expérimentalement. Ainsi, nous avons sélectionné trois tâches : une tâche de « travail », une tâche de lecture et enfin une tâche de repos.

2.2.3.1. Tâche 1 de « travail » : Toulouse N-back Task

Lorsqu'on parle de « travail » on peut imaginer une quantité infinie de tâche, car le « travail » est une notion propre à chacun. Néanmoins, nous voulions évaluer une tâche qui nécessite l'engagement de beaucoup de ressources cognitives pour recréer un contexte durant lequel le passager doit être bien concentré. Pour cela, une tâche combinant raisonnement, mémoire de travail et calcul mental nous a semblé être optimale. Ainsi la *Toulouse N-back Task* (TNT; Causse, Peysakhovich, & Mandrick, 2017 ; Mandrick et al., 2016) s'est révélée être appropriée.

La TNT combine une tâche de n-back classique (Kirchner, 1958) à du calcul mental. Dans la tâche de n-back classique il est demandé aux participants de mémoriser des items (des chiffres ou des lettres) présentés un à un et de les comparer aux items précédant son apparition (comparé l'item $x^{\text{ème}}$ à l'item $x-n^{\text{ème}}$ items précédant, Figure 41). Dans cette version revisitée, les items sont remplacés par des opérations mathématiques dont le résultat est comparé à celui obtenu à des opérations précédentes. Les opérations arithmétiques consistaient en des additions ou soustractions de multiples de 5 compris entre 10 et 95 (par exemple, $15 + 40$ ou $90 + 35$; Figure 41). Plusieurs niveaux de difficultés peuvent être établis pour cette tâche, dont la difficulté augmente en fonction du nombre d'items à retenir. Pour notre étude, nous avons décidé d'expérimenter seulement deux difficultés dont le contraste des performances était le plus important : le 0-back et le 2-back. En effet, les précédentes études utilisant la TNT (Causse, Peysakhovich, et al., 2017 ; Mandrick et al., 2016) ont montré que les différences observées sur des enregistrements physiologiques (activité hémodynamique du cerveau et activité cardiaque) étaient les plus importantes entre le 0-back et le 2-back. Les consignes données aux participants pour chaque difficulté étaient les suivantes :

- 0-back : Pour cette difficulté établie comme étant la plus facile, les participants devaient comparer le résultat de l'opération à 50. Si le résultat était égal à 50, ils devaient appuyer sur le bouton vert du boîtier de réponse Cedrus, sinon sur le bouton rouge (Figure 41, Figure 42).
- 2-back : Cette difficulté, définie comme la plus difficile, consistait à comparer le résultat de l'opération présentée à celui calculé deux opérations précédentes. S'ils étaient égaux, les participants devaient appuyer sur le bouton vert du boîtier de réponse Cedrus, sinon sur le bouton rouge (Figure 41, Figure 42).

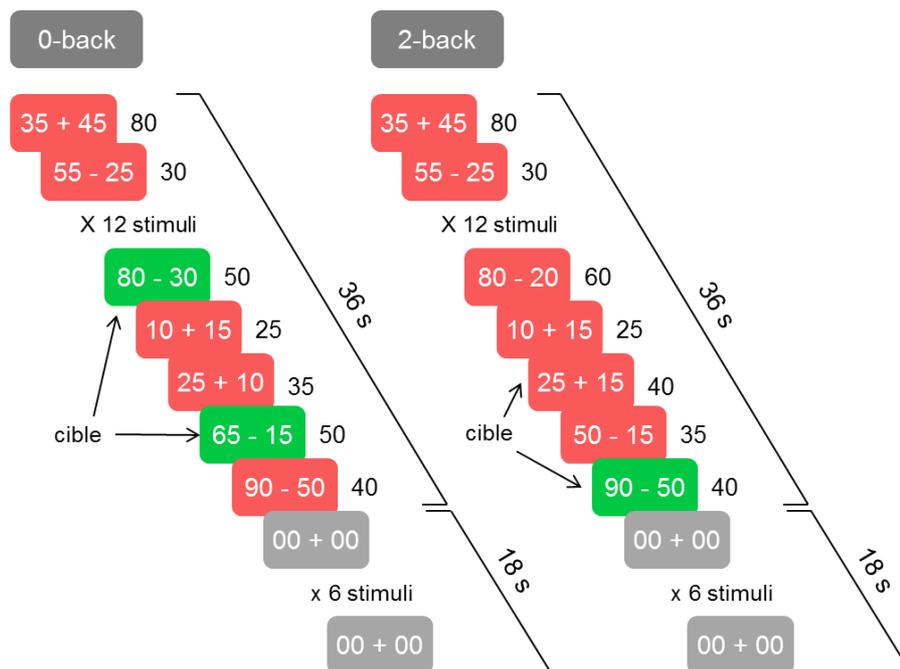


Figure 41 : Illustration d'un exemple de séquence d'opérations de la Toulouse N-back Task pour les difficultés 0-back et 2-back. Les opérations en rouge représentent les opérations non-cibles et les vertes les cibles. Les opérations « 00+00 » étaient une condition de repos.

Une opération était présentée seulement durant deux secondes avec un intervalle inter-stimulus de 1 seconde. Le temps de présentation de l'opération correspondait également à la durée durant laquelle les participants pouvaient répondre, ils avaient donc un temps de réponse limité à deux secondes. Les opérations étaient présentées par blocs de difficulté (0-back ou 2-back) de 12 opérations dont 4 étaient des opérations cibles, c'est-à-dire les opérations pour lesquelles les participants devaient répondre positivement (en appuyant sur le bouton vert lorsque les résultats étaient égaux). Une condition additionnelle présentant 6 opérations « 00+00 » apparaissait à la fin de chaque bloc et consistait simplement à appuyer sur un bouton vert. Cette condition permettait d'ajouter une condition contrôle de repos. Ainsi chaque bloc était composé de 12 stimuli n-back et 6 stimuli repos, ils étaient présentés 3 fois chacun (6 blocs en tout), ce qui représente 36 stimuli 0-back et 36 stimuli 2-back. La durée totale de la TNT était de 5 minutes et 30 secondes. Un entraînement avec les instructions et plus court, c'est-à-dire avec moins de stimuli (10 opérations de chaque difficulté) leur était présenté afin de se familiariser avec les consignes. Durant cet entraînement, l'expérimentatrice donner un retour sur le nombre de bonnes réponses obtenues.



Figure 42 : Photographie d'une participante réalisant la TNT avec un casque EEG sur la tête et le casque audio AKG. Elle réalise la tâche en utilisant le boîtier de réponse Cedrus.

2.2.3.1.1. Mesure de l'empan mnésique

Afin d'évaluer les capacités de mémoire à court-terme des participants, un test d'empan mnésique était réalisé avant la passation de la TNT. Nous avons décidé d'évaluer l'empan mnésique pour cette expérience pour pouvoir expliquer les différences interindividuelles des performances à la TNT. En effet, des auteurs (Kane, Conway, Miura, & Colflesh, 2007) ont montré que les performances lors d'une tâche de n-back classique étaient fortement corrélées à celle d'empan mnésique.

L'empan mnésique correspond au nombre d'éléments qui peuvent être immédiatement rappelés après les avoir reçus. Ce dernier est estimé à une moyenne de 7 ± 2 items (Blankenship, 1938 ; Crannell & Parrish, 1957). Pour estimer l'empan mnésique d'un participant, une liste de chiffres, de lettres ou de mots aléatoires peuvent être présentés sur un écran de manière séquentielle à une fréquence de 1 item par seconde (Blankenship, 1938 ; Humpstone, 1919). Cependant, nous avons décidé de le réaliser avec des consonnes pour éviter les combinaisons de lettres ou de chiffres qui rendent le rappel plus facile (Crannell & Parrish, 1957). Le participant avait pour consigne de rappeler les items une fois que la série d'items avait été présentée. Le test commençait avec seulement trois items et augmentait en difficulté

par l'ajout d'un item par niveau. Le rythme de présentation a été choisi rapide (1s par item) afin d'éviter la réalisation d'association d'items. Ainsi, chaque item était présenté durant 900 ms suivi de 100 ms de pause. Le test s'arrêtait lorsque le participant réalisait trois erreurs sur le même niveau de difficulté. Son empan mnésique correspondait alors au nombre d'items retenu au dernier niveau réussi. Deux variantes de l'empan ont été utilisées : l'empan endroit et l'empan envers. Dans la première variante, les sujets avaient pour consigne de rappeler les items dans l'ordre de présentation. Et dans la deuxième variante, qui avait pour but d'évaluer la mémoire de travail, les participants devaient restituer les items dans l'ordre inverse. La procédure était donc la même à l'exception du rappel qui était inversé. Notons, qu'il existe deux facteurs intrinsèques pouvant influencer sur l'empan mnésique et donc sur les performances de rappel. Le premier est l'âge, l'empan croît de l'enfance à l'âge adulte, puis décroît légèrement avec la vieillesse (Bopp & Verhaeghen, 2005). Le deuxième est la pratique de la musique qui améliore l'empan mnésique (Snyder & Snyder, 2000).

2.2.3.2. Tâche 2 de « lecture »

La tâche de lecture consistait simplement à lire des textes. Cependant pour sélectionner les textes, plusieurs critères devaient être pris en compte. Premièrement, nous devons sélectionner six textes distincts qui devaient être suffisamment long pour être lus pendant au moins 5 minutes. Cette durée permettait de garantir une lecture tout au long de la diffusion des bruits et autorisait également un recueil suffisant de données psychophysiologiques. Pour définir la longueur de texte nécessaire pour avoir un minimum de 5 minutes de lecture, nous avons utilisé l'étude de Trauzettel-Klosinski et Dietz (2012), qui a évalué la vitesse de lecture de 10 textes standardisés traduits en 17 langues sur un total de 436 sujets. Les chercheurs ont établi que la vitesse de lecture moyenne est de 184 ± 29 mots/minute. Ainsi pour un texte devant durer 5 minutes, nous nécessitions au minimum 1065 mots ($[184 + 29] \times 5$). Un second critère à prendre en compte était le caractère universel du texte, c'est-à-dire que toute personne devait pouvoir être capable de le lire. Ainsi, les textes ne devaient pas nécessiter de connaissances particulières pour le comprendre. De plus, nous les voulions émotionnellement neutres afin de ne pas provoquer de réaction physiologiques qui auraient pu biaiser les résultats attendus. Nous voulions également respecter une cohérence d'écriture entre chaque texte, avec le même champ lexical pour chaque texte. Nous avons donc décidé d'utiliser des textes extraits d'un livre écrit par un seul auteur. Un autre critère qui nous semblait important était de sélectionner une histoire distrayante pour augmenter l'engagement dans la tâche. En effet, il a été montré que plus la

motivation est importante et plus l'engagement dans la tâche de lecture est importante, améliorant la compréhension du texte (Guthrie, Wigfield, Metsala, & Cox, 1999). Finalement, nous avons besoins de textes de difficultés équivalentes. Nous avons pu tester la difficulté des textes grâce à un outil de calcul de la lisibilité, mis à disposition par Translat Lab (<https://labs.translated.net/lisibilite-texte/>). Cet outil permet d'analyser la fréquence du vocabulaire utilisé et la longueur des phrases. En effet, la terminologie d'un texte joue également dans sa lisibilité : plus les mots sont fréquents et donc probables, plus ils seront facile à lire et à comprendre (Klare, 1968). De plus, d'après la loi de Zipf (1932, 1949), plus les mots sont courts, plus ils seront courants. Pour estimer la fréquence des mots, cet outil utilise différentes métriques : statistique de poisson, méthode du maximum de vraisemblance, entropie relative.

Notre choix s'est porté sur des extraits du livre de science-fiction « La nuit des temps » de Barjavel (1968), qui ont été sélectionnés aléatoirement dans les parties présentant au moins 1065 mots. Le niveau de difficulté de lecture pour chaque texte a été évalué comme moyen, correspondant à la difficulté rencontrée pour une majorité de texte. Nous avons fait en sorte que l'affichage de la tâche soit fait sur 5 pages (Figure 43) durant l'expérience ainsi nous avons dû ajuster et augmenter le nombre de mots sélectionnés pour certains textes. Tous les textes se terminaient par une phrase entière. La moyenne du nombre de mots par texte était de 1163 ± 50 mots et le nombre de caractères était de 7091 ± 63 caractères (Tableau 3). Les textes étaient contrebalancés (i.e., permet d'équilibrer l'ordre de présentation entre les participants) et présentés dans un ordre aléatoire.

Tableau 3 : Description résumé des six textes sélectionnés dans le livre « La nuit des Temps » (Barjavel, 1968)

Extrait	Pages du livre	Difficulté	Nombre de mots	Nombre de caractères
Texte 1	73-76	Moyenne	1162	7031
Texte 2	93-96	Moyenne	1210	7068
Texte 3	150-153	Moyenne	1164	7176
Texte 4	182-185	Moyenne	1184	7164
Texte 5	199-202	Moyenne	1189	7050
Texte 6	205-209	Moyenne	1068	7055

Les textes ont été affichés à l'écran avec Matlab et la toolbox Psychtoolbox. Ils étaient affichés avec une police Helvetica de taille 18 justifié, avec un interligne de 2,5 et un nombre de caractères de 95 par ligne (Figure 43). Les participants pouvaient avancer à leur rythme et gérer le temps de lecture grâce aux flèches droite et gauche pour avancer ou revenir sur une page. Les textes étaient présentés dans un ordre aléatoire pour chaque participant.

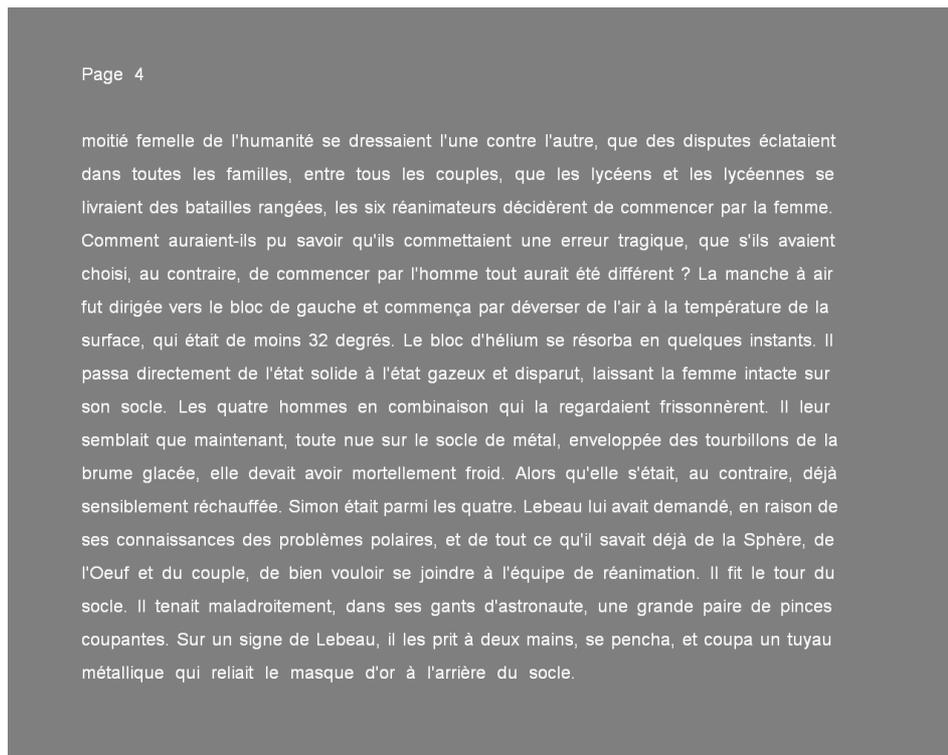


Figure 43: Exemple de texte présenté à l'écran lors de la tâche de lecture. Le texte présenté représente la page 4 du texte 1.

La consigne donnée aux participants était de lire le texte à une vitesse normale permettant de lire confortablement le texte sans problème de compréhension.

Pour augmenter la motivation et l'engagement dans la tâche, une question de compréhension était posée à la fin de chaque lecture. Les questions ont été élaborées de manière à ne pas être difficiles et risquer des relectures des participants pouvant biaiser les résultats. Les questions étaient présentées sous forme de QCM, avec une seule réponse valide parmi plusieurs choix.

Un oculomètre (*eye-tracker*) a été utilisé durant cette expérience pour recueillir l'activité oculaire des participants. On sait que, durant la lecture, les mouvements des yeux ne sont pas continus mais rapides et saccadés, en marquant des courts arrêts (fixation) et en réalisant des sauts (saccades). De plus, une fixation

peut être plus longue dans le cas où le mot lu est difficile, rare ou incompris. Enfin, lorsque le lecteur exprime des difficultés, il aura tendance à réaliser plus souvent des régressions qui sont des retours en arrière pour relire un mot ou une phrase. De ce fait, les données oculométriques récoltées durant la tâche de lecture étaient le nombre de fixations, la longueur des saccades et le nombre de régressions. En effet, le mouvement des yeux reflètent les difficultés que les lecteurs ont pour encoder les mots et comprendre le texte (Rayner, Chace, Slattery, & Ashby, 2006).

Pour finir, le temps de lecture a également été enregistré afin de fournir une estimation de la vitesse de lecture des participants.

2.2.3.3. Tâche 3 de « repos »

Plusieurs tâches de repos existent dans la littérature consistant à rester passif les yeux ouverts ou avec les yeux fermés. Ces tâches servent souvent de base de référence pour des comparaisons avec d'autres tâches. Il est recommandé d'utiliser la variante avec les yeux ouverts dans les cas où les comparaisons se font avec des tâches qui se réalisent les yeux ouverts (Barry, Clarke, Johnstone, Magee, & Rushby, 2007). Cette variante se fait en fixant une croix au centre d'un écran. Néanmoins, dans notre cas nous voulions une tâche un peu plus représentative de ce que peut expérimenter un passager dans un hélicoptère. C'est pourquoi nous avons décidé de présenter une vidéo sur laquelle des nuages défilaient, ainsi les participants pouvaient s'imaginer observer le paysage extérieur. Nous avons sélectionné une vidéo de relaxation issue de Youtube (<https://youtu.be/SOePBaPqUjU>) présentant des nuages virtuels avançant vers l'observateur (Figure 44). Cette vidéo a été sélectionnée en raison de sa répétitivité. En effet, la contrainte de cette expérience était de trouver une vidéo d'une durée de 5 minutes. Celle-ci a l'avantage de présenter un cycle d'images qui se renouvellent toutes les 5 secondes ce qui permet d'extraire 5 minutes de vidéo de la vidéo originale (d'une durée de 3h) sans problème de transitions.



Figure 44: Capture d'écran de la vidéo utilisée lors de la tâche de repos. Cette vidéo représente des nuages qui défilent.

La consigne donnée aux participants était la suivante : « Imaginez-vous dans un hélicoptère, vous ne faites rien et vous vous détendez pendant le trajet ».

Des bandes noires horizontales étaient présentes sur la vidéo (en haut et en bas). Un fond noir a donc été ajouté derrière la vidéo et créer un cadre noir autour de la vidéo (Figure 45).



Figure 45: Capture d'écran réalisé durant la tâche de repos. On peut voir le cadre noir autour de la vidéo de nuages.

2.2.4. Tests subjectifs

Afin de mesurer le ressenti des participants des tests et des questionnaires ont été utilisés. Ils nous ont permis d'évaluer le ressenti subjectif des différents bruits ou d'étudier l'effet modérateur de différentes variables sur l'impact du bruit. Parmi ces tests, certains sont des tests psychométriques (ayant été élaborés et évalués de manière expérimentale).

2.2.4.1. Echelle de difficulté

La difficulté ressentie a été évaluée à l'aide d'une échelle de Likert de 11 points allant de 0 à 10 (0 correspondant à "aucune difficulté" et 10 à "impossible à atteindre"). Précédé de la question : "Comment définiriez-vous la difficulté à réaliser la tâche ?". Pour la tâche de « travail » (TNT), deux échelles de difficulté étaient présentées, une pour chacune des difficultés (0-back et 2-back).

2.2.4.2. Echelle de fatigue

Pour évaluer la fatigue des participants, un questionnaire d'évaluation subjective de la fatigue inspiré du *Karolinska Sleepiness Scale* (Shahid, Wilkinson, Marcu, & Shapiro, 2012) leur a été administré. Il était demandé aux participants : "Sur une échelle de 1 à 9, à quel point vous sentez-vous endormi(e) ? ». Les participants pouvaient choisir leurs réponses parmi celles-ci :

1. Très éveillé(e)
- 2.
3. Eveillé(e) (normal)
- 4.
5. Ni Eveillé(e) ni fatigué(e)
- 6.
7. Somnolent
- 8.
9. Très somnolent, je lutte pour ne pas dormir

Ce questionnaire était présenté au début de l'expérience pour évaluer l'état de fatigue avant toutes tâches. Puis il était présenté à la fin de chaque condition, pour évaluer l'impact de la tâche ou de la condition sonore sur le niveau de fatigue.

2.2.4.3. Sensibilité au bruit

La sensibilité au bruit des participants a été évaluée grâce à un test psychométrique, le *Noise Sensitivity Scale – Short Form (NSS-SF)* de Benfield et al. (2014). Ce test est une version abrégée du NSS de Weinstein (1978), qui réduit le nombre d'items à 5 au lieu de 21. Les réponses ont été enregistrées grâce à des échelles de Likert à 6 points allant de 1 pour « Pas du tout d'accord » à 6 pour « Tout à fait d'accord ». Le score a été obtenu en sommant tous les items, avec le 5^{ème} item qui a un score inversé. Ainsi, plus le score est élevé et plus la sensibilité au bruit du participant est importante, avec un score maximum de 30 et un score minimum de 5. Les items ont été traduits de l'anglais au français par des personnes anglophones (Tableau 4), mais cette traduction n'a pas été validée psychométriquement. Ce questionnaire était présenté à la fin de chaque condition.

Tableau 4 : Items du questionnaire de sensibilité au bruit NSS-SF (Benfield et al., 2014) avec leur traduction en français

Item en anglais	Traduction en français
<i>I am sensitive to noise</i>	<i>Je suis sensible au bruit</i>
<i>I find it hard to relax in a place that's noisy</i>	<i>J'ai du mal à me détendre dans un endroit bruyant</i>
<i>I get mad at people who make noise that keeps me from falling asleep or getting work done</i>	<i>Je suis furieux contre les gens qui font du bruit qui m'empêchent de m'endormir ou de travailler</i>
<i>I get annoyed when my neighbors are noisy</i>	<i>Je suis énervé lorsque mes voisins sont bruyants</i>
<i>I get used to most noises without much difficulty</i>	<i>Je m'habitue à la plupart des bruits sans trop de difficulté</i>

2.2.4.4. Habitudes d'écoute et environnement sonore

Un questionnaire a été créé dans l'objectif de définir les habitudes d'écoute des participants ainsi que l'environnement sonore auquel ils sont habitués lorsqu'ils travaillent. Le questionnaire suivant leur était présenté :

- J'ai l'habitude de travailler dans un environnement :
 - Très calme
 - Calme
 - Moyennement bruyant

- Bruyant
- Très Bruyant
 - Précisez la source sonore si vous avez répondu « moyennement bruyant », « bruyant » ou « très bruyant » :
 - Musique
 - Transport en commun
 - Trafic aérien
 - Trafic ferroviaire
 - Trafic routier
 - Bruit urbain (rue piétonne, bars, etc.)
 - Travaux et chantiers ponctuels et durables (carrières)
 - Sources mécaniques continues ou ponctuelles (machines, usines, VMC)
 - Voix conversationnelles
 - Voix criées (bébé)
 - Sources animales (abolement, élevage, refuge)
 - Autres (à préciser) :

2.2.4.5. Personnalité

Le test de personnalité d'Eysenck en version révisée, abrégée et traduite en français, appelé *Eysenck Personality Questionnaire Revised – Abreged* (EPQR-A; Bouvard et al., 2010) a été présenté aux participants. Il a permis d'évaluer leur degré d'extraversion et de neuroticisme. Ce questionnaire permet d'évaluer les quatre dimensions de la personnalité d'après Eysenck (1985) : l'extraversion, le neuroticisme, le psychoticisme et une échelle de mensonge. Malgré que les scores de psychoticisme et de mensonge n'aient pas été utiles pour ces expériences, le questionnaire a été administré dans son entièreté. Le questionnaire comportait 24 questions dont six par dimension. Les réponses aux questions étaient binaires. La réponse « Oui » était évalué par 1 et la réponse « Non » par 0. Certains items avaient des échelles inversées (Tableau 5). Les scores étaient ensuite obtenus en additionnant les réponses. Un score maximum de 6 et un score minimum de 0 pouvaient être obtenus pour chaque dimension. Plus le score était élevé dans la dimension plus la personne avait un trait fort de la dimension de la personnalité.

Afin de classer les participants en deux groupes de degré d'extraversion différent (introvertis/extravertis), nous avons utilisé les seuils de Bouvard et al. (2010) établissant que les scores moyens d'extraversion au questionnaire EPQR-A varient entre 2,68 et 3,93. Pour le neuroticisme, les scores moyens varient entre 2,38 et 3,99.

Tableau 5: Items du questionnaire de personnalité EPQR-A (Bouvard et al., 2010)

Dimension	Echelle inversée	Item en français
Neuroticisme	oui	Votre humeur subit-elle souvent des hauts et des bas ?
Extraversion	oui	Aimez-vous beaucoup parler ?
Psychoticisme	non	Seriez-vous mal à l'aise si vous aviez des dettes ?
Extraversion	oui	Êtes-vous plutôt quelqu'un plein d'entrain ?
Mensonge	non	Vous est-il arrivé d'avoir une si grande envie de quelque chose que vous vous êtes arrangé(e) pour vous servir plus que la part qui vous revenait ?
Psychoticisme	oui	Accepteriez-vous de prendre des drogues qui pourraient avoir des effets étranges ou dangereux ?
Mensonge	non	Vous est-il déjà arrivé de blâmer quelqu'un pour une faute, sachant que c'est vous qui l'aviez commise ?
Psychoticisme	oui	Préférez-vous faire les choses à votre façon plutôt que d'agir en fonction des règles ?
Neuroticisme	oui	Vous arrive-t-il souvent d'en « avoir marre » ?
Mensonge	non	Vous est-il arrivé de prendre quelque chose appartenant à quelqu'un d'autre (ne serait-ce qu'une épingle ou un bouton) ?
Neuroticisme	oui	Vous considérez-vous comme une personne nerveuse ?
Psychoticisme	oui	Estimez-vous que le mariage soit une institution dépassée qui devrait être abolie ?
Extraversion	oui	Savez-vous aisément animer une soirée ennuyeuse ?
Neuroticisme	oui	Êtes-vous un(e) inquiet(e) ?
Extraversion	non	Avez-vous tendance à rester à l'arrière-plan lorsque vous êtes en société ?
Psychoticisme	non	Êtes-vous tourmenté(e) si vous savez qu'il y a des erreurs dans votre travail ?
Mensonge	non	Vous est-il arrivé de tricher à un jeu ?
Neuroticisme	oui	Souffrez-vous de vos « nerfs » ?
Mensonge	non	Vous est-il arrivé de profiter de quelqu'un ?
Extraversion	non	Êtes-vous le plus souvent silencieux.se lorsque vous êtes avec d'autres personnes ?
Neuroticisme	oui	Vous sentez-vous souvent seul(e) ?
Psychoticisme	non	Est-il mieux de suivre les règles sociales plutôt que de faire les choses à sa façon ?
Extraversion	oui	Les autres vous estiment-ils plein d'entrain ?
Mensonge	oui	Mettez-vous toujours en pratique ce que vous prêchez ?

2.2.4.6. Stress SSSQ

Un questionnaire d'évaluation de l'état de stress (*Short Stress State Questionnaire* (SSSQ) de Helton (2004) a été présenté aux participants afin d'évaluer

son effet modérateur sur l'impact du bruit sur le stress. Ce questionnaire est une version courte du *Dundee Stress State Questionnaire* (DSSQ; Matthews et al., 1999, 2002) avec seulement 24 items au lieu des 90 de l'original. Ce questionnaire permet d'évaluer trois dimensions du stress : le stress négatif (*Distress* en anglais), l'engagement dans la tâche (*Task engagement* en anglais) et l'inquiétude (*Worry* en anglais). Selye (1975) a distingué deux types de stress : le stress négatif (*distress* en anglais), associé à des événements indésirables, fait opposition au stress positif (*eustress* en anglais), pouvant être bénéfique et source de motivation. Dans la suite du manuscrit, nous utiliseront le terme « stress » pour désigner le terme « stress négatif ». Le SSSQ comprend 24 items dont 8 par dimension. Les réponses des participants ont été recueillies grâce à des échelles de Likert à 5 point avec 1 = « pas du tout d'accord » et 5 = « tout à fait d'accord ». Les scores ont été normalisés de -1 à 1 : (-1 = « pas du tout » ; -0,5 ; 0 ; 0,5 ; 1 = « tout à fait d'accord »). Des moyennes ont ensuite été réalisées pour les 8 items de chacune des dimensions. Ces items ont été traduits de l'anglais au français par des personnes anglophones (Tableau 6), mais cette traduction n'a pas été validée psychométriquement. Ce questionnaire été présenté à la fin de chaque condition.

Tableau 6 : Items du questionnaire d'évaluation de l'état de stress SSSQ (Helton, 2004) avec leur traduction en français

Facteur	Item en anglais	Traduction
Détresse	I feel dissatisfied	Je me sens insatisfait
	I feel depressed	Je me sens déprimé
	I feel sad	Je me sens triste
	I feel impatient	Je me sens impatient
	I feel annoyed	Je me sens ennuyé/agacé
	I feel angry	Je me sens en colère
	I feel irritated	Je me sens irrité
	I feel grouchy	Je me sens grognon
Engagement dans la tâche	I am committed to attaining my performance goals	Je suis déterminé à atteindre mes objectifs de performance
	I want to succeed on the task	Je veux réussir la tâche
	I am motivated to do the task	Je suis motivé à faire la tâche
	I feel alert	Je me sens alerte
	I feel active	Je me sens actif
	I feel confident about my abilities	Je me sens confiant à propos de mes capacités
	I expect to perform proficiently on this task	Je m'attends à réaliser cette tâche de manière compétente
	Generally, I feel in control of things	Généralement, je suis en mesure de maîtriser les choses
Inquiétude	I'm trying to figure myself out	J'essaie de me comprendre
	I'm reflecting about myself	Je réfléchis sur moi-même
	I'm daydreaming about myself	Je rêve à propos de moi
	I feel self-conscious	Je me sens gêné
	I am worried about what other people think of me	Je m'inquiète de ce que les autres pensent de moi
	I feel concerned about the impression I am making	Je suis préoccupé par l'impression que je donne
	I thought about how others have done on this task	J'ai pensé à la façon dont les autres ont réalisé cette tâche
	I thought about how I would feel if I were told how I performed	J'ai pensé à ce que je ressentirais si on m'avait commenté dis j'ai réussi la tâche

2.2.4.7. Evaluation perceptive du bruit

Pour déclarer leur perception subjective des sons, les participants devaient répondre à un questionnaire inspiré de celui de Ryherd & Wang (2007, 2008). Les termes utilisés à l'origine étant en anglais, une traduction en français a été réalisée par des personnes anglophones. Les items anglais et leurs traductions sont présentés dans le Tableau 7. Les participants répondaient à l'aide d'une échelle de Likert à 7 points dont les étiquettes des valeurs extrêmes dépendaient de l'item associé (Tableau 7). La question posée aux participants était la suivante : « Comment avez-vous perçu le bruit ? ».

Tableau 7 : Items du questionnaire d'évaluation subjective des conditions sonores

Item en anglais	Traduction en français	Etiquette associé à la valeur n°1 de l'échelle	Etiquette associé à la valeur n°7 de l'échelle
Loudness	Intensité	pas fort	très fort
Rumble	Composante grave	pas grave	très grave
Roar	Composante moyenne	pas medium	très medium
Hiss	Composante aiguë	pas aigu	très aigu
Tonality	Tonalité	pas tonal	très tonal
Fluctuations over time	Fluctuations dans le temps	pas fluctuant dans le temps	très fluctuant dans le temps
Distraction	Distraction	pas distrayant	très distrayant
Annoyance	Agaçant ¹	pas agaçant	très agaçant

Afin de les aider à mieux comprendre les termes liés aux 8 items, les participants réalisaient une session d'entraînement avant de commencer l'expérience. Nous leur avons présenté différents sons associés aux termes utilisés lors du questionnaire.

- Bruit grave : bruit contenant des basses fréquences excessives (16-63 Hz)
- Bruit médium : bruit contenant des moyennes fréquences excessives (125-500 Hz)
- Bruit aigu : bruit contenant des hautes fréquences excessives (1000-8000 Hz)

¹ Nous avons traduit le terme « *annoyance* » par « agaçement », cependant le terme « gêne » est plus courant en psychoacoustique.

- Bruit tonal : bruit large bande contenant une tonalité à 500 Hz. Exemple de bruit tonal pur : tonalité du téléphone lorsqu'on émet un appel : bip sonore à 440 Hz.

En complément de ce questionnaire, il était demandé aux participants d'estimer à quel point ils avaient trouvé le bruit fatigant, stressant ou s'ils s'y étaient habitués (Tableau 8). Ce questionnaire était présenté à la fin de chaque condition.

Tableau 8 : Items complémentaires au questionnaire d'évaluation subjective des conditions sonores

Items	Etiquette associé à la valeur n°1 de l'échelle	Etiquette associé à la valeur n°7 de l'échelle
J'ai trouvé le bruit fatigant au fil du temps :	1 = « pas du tout d'accord »	7 = « tout à fait d'accord »
Je me suis habitué au bruit au fil du temps :	1 = « pas du tout d'accord »	7 = « tout à fait d'accord »
J'ai trouvé le bruit stressant au fil du temps :	1 = « pas du tout d'accord »	7 = « tout à fait d'accord »

2.2.4.8. Comparaisons par paires

Afin de définir quel bruit a été jugé le plus dérangeant pour chaque participant, des comparaisons par paires ont été réalisées. Les participants écoutaient des combinaisons aléatoires de paires de bruit permettant de comparer chacun des bruits les uns des autres. Les bruits étaient présentés d'affilée durant 5 secondes avec un intervalle inter-stimulus de 2 secondes. Les participants avaient pour consigne de choisir lequel des deux sons ils avaient trouvé le plus dérangeant. Ils sélectionnaient le bruit comme étant le plus dérangeant à l'aide des touches « 1 » ou « 2 » de pavé numérique correspondant respectivement au premier et deuxième bruit écouté. Ils pouvaient écouter autant de fois que nécessaire la paire de bruit en appuyant sur la touche « R ».

2.2.5. Procédure

La procédure suivie pour chaque expérience a été la suivante :

- Signature de la notice d'information et du consentement éclairé ;
- Réalisation d'un audiogramme ;
- Remplissage des questionnaires :
 - o Questionnaire d'informations démographiques (âge, niveau d'étude, heures de sommeil, etc.) ;
 - o Questionnaire de sensibilité au bruit (NSS-SF) ;

- Questionnaire d'habitude d'écoute et d'environnement sonore ;
- Test de personnalité (EPQR-A) ;
- Pause du casque EEG et des électrodes ECG en parallèle du remplissage des questionnaires ;
- Présentation et réalisation de la tâche d'empan endroit puis d'empan envers uniquement dans le cas de la tâche 1 de « travail »;
- Présentation orale des consignes pour la suite de l'expérience ;
- Pause du casque audio
- Entraînement à l'écoute des sons grave, medium, aigu et tonal ;
- Instructions écrites et entraînement à la TNT uniquement dans le cas de la tâche 1 de « travail » ;
- Début de la tâche (TNT, lecture ou repos) : 6 présentations de la tâche ;
- Comparaisons par paires des sons.

Pour chaque condition sonore, la procédure présentée dans la Figure 46 a été suivie, à l'exception de la condition silencieuse où il n'y avait pas les 2 minutes d'exposition au bruit pour habituer les participants. De plus, le niveau de difficulté de la tâche de repos n'était pas demandé aux participants. Les conditions sonores étaient contrebalancées et présentées dans un ordre aléatoire. Ainsi, la tâche était réalisée 6 fois de suite pour chacune des conditions sonores². Une expérience durait en tout entre 2h et 2h30.

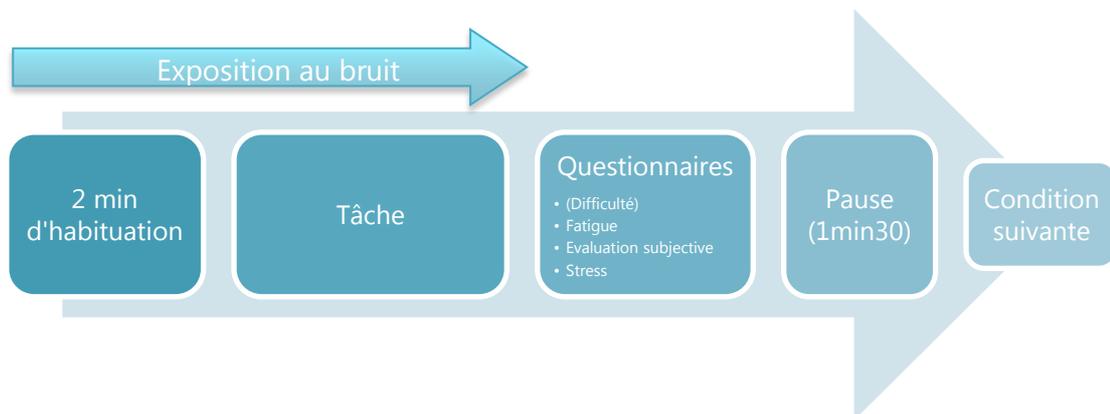


Figure 46 : Procédure suivie pour chaque condition sonore à l'exception de la condition silencieuse sans habituation au bruit

² Dans la suite du manuscrit, le terme présentation désignera les répétitions de la tâche.

2.3. TRAITEMENT DU SIGNAL

Nous décrivons ici les différentes étapes de traitement suivies pour prétraiter les données psychophysiques.

2.3.1. Traitement des données EEG

Le traitement des données EEG a nécessité une première étape de nettoyage des signaux, consistant à filtrer le bruit, les artefacts musculaires et les clignements des yeux. En effet, l'activité électrique musculaire étant largement plus importante que celle des neurones, les clignements des yeux et autres artefacts musculaires liés aux mouvements du participant vont brouter le signal EEG. Le traitement du signal a été réalisé grâce à la toolbox EEGLab (version 14.1.2; Delorme & Makeig, 2004) sous Matlab 2018b. La procédure suivie a été celle recommandée par Makoto (s.d.).

La première étape du prétraitement a consisté à sous-échantillonner les signaux de 512 à 256 Hz, afin de réduire le temps de traitement tout en gardant une fréquence d'échantillonnage suffisante (2 fois la fréquence maximum d'intérêt). Le référencement des électrodes a été réalisé grâce à la moyenne de toutes les électrodes, jugé plus précis que le référencement sur les électrodes mastoïdes (Bertrand, Perrin, & Pernier, 1985 ; Junghöfer, Elbert, Tucker, & Braun, 1999). Un filtre passe-haut à 1 Hz a été appliqué afin de supprimer les effets de dérives (Luck, 2005). La toolbox CleanLine (Mullen, 2012) a été utilisée pour supprimer le bruit à 50 Hz dû au réseau électrique. La fonctionnalité *clean_rawdata* d'EEGLab a été utilisée pour rejeter automatiquement les électrodes bruitées du signal continu, grâce à la méthode *Artifact Subspace Reconstruction* (ASR; Mullen et al., 2013), qui supprime les artefacts de haute variance par comparaison d'un segment de données relativement exempt d'artefacts (Bigdely-Shamlo, Mullen, Kothe, Su, & Robbins, 2015). Les électrodes supprimées ont ensuite été interpolées pour minimiser les biais potentiels de l'étape suivante, consistant à un deuxième référencement par la moyenne des électrodes.

La deuxième partie du traitement des signaux EEG avait pour objectif de calculer les puissances spectrales associées à chacune des bandes de fréquences en fonction des conditions expérimentales. Ainsi, pour chaque condition sonore et pour chacune des 64 électrodes, la puissance spectrale a été extraite grâce à la fonctionnalité *spectopo* d'EEGLab utilisant la fonction *psd* (*power spectral density*) de Matlab. La puissance absolue a été obtenue grâce à l'équation suivante pour chaque bande de fréquence.

$$|Puissance_{bande}| = moyenne(10^{\frac{puissance_{bande}}{10}}) \quad (5)$$

Des clusters d'électrodes ont été sélectionnés pour calculer la puissance fréquentielle par zones cérébrales. Pour la zone frontale, un cluster de 8 électrodes a été moyenné : Fp1, AF7, AF3, FPz, FP2, AF, AF4, AFz. Pour la zone pariéto-occipitale, 6 électrodes ont été moyennées : PO7, PO3, O1, Iz, Oz, PO8, PO4, O2.

Le ratio TLI a été calculé en divisant la puissance thêta de l'électrode Fz sur la puissance alpha de l'électrode Pz.

2.3.2. Traitement des données ECG

La première étape du prétraitement a consisté à sous-échantillonner les signaux de 512 à 256 Hz, afin de réduire le temps de traitement tout en gardant une fréquence d'échantillonnage suffisante (2 fois la fréquence maximum d'intérêt). La deuxième étape consistait à nettoyer les signaux pour supprimer l'activité ne relevant pas de l'activité musculaire cardiaque. Ainsi, un filtre passe-bande entre 1 à 30 Hz en utilisant un filtre Butterworth d'ordre 5. Pour finir, pour obtenir un unique tracé ECG à partir des deux électrodes cardiaques, l'enregistrement de l'électrode de la clavicule droite a été soustrait de celui de l'électrode sur les côtes gauches (ECG = signal_{électrode côtes} – signal_{électrode clavicule}).

Afin de déterminer le rythme cardiaque pour chaque condition, une fonction Matlab de détection automatique de pic a été utilisée (*findpeaks*). Cette fonction prend en paramètres un seuil et une période réfractaire qui ont été calculés pour chaque participant et chaque condition sonore. Le seuil correspondait à l'amplitude minimale pour être considéré comme un pic. La valeur par défaut de ce seuil correspondait à la moitié de la valeur maximale du signal. La période réfractaire correspondait à une distance minimale à respecter entre chaque pic. Par défaut, cette période était de 200 ms.

Une inspection visuelle a été effectuée pour rejeter les enregistrements de faible qualité, correspondant à des signaux bruités ou des battements anormaux. Si nécessaire, les deux paramètres étaient ajustés manuellement pour mieux détecter les pics.

Il a été montré que lorsque l'enregistrement ECG est inférieur à 5 minutes (ce qui a pu être le cas dans la tâche de lecture dont la durée d'exposition dépendait de la vitesse de lecture des participants), le nombre de battements minimum pour réaliser un calcul de HRV doit être de 240 (Clifford, 2002). Ainsi, les segments de données qui ne respectaient pas cette condition ont été exclus des analyses.

Finalement, les métriques de l'ECG utilisées étaient le nombre de battements par minute (BPM) et l'indice NN50.

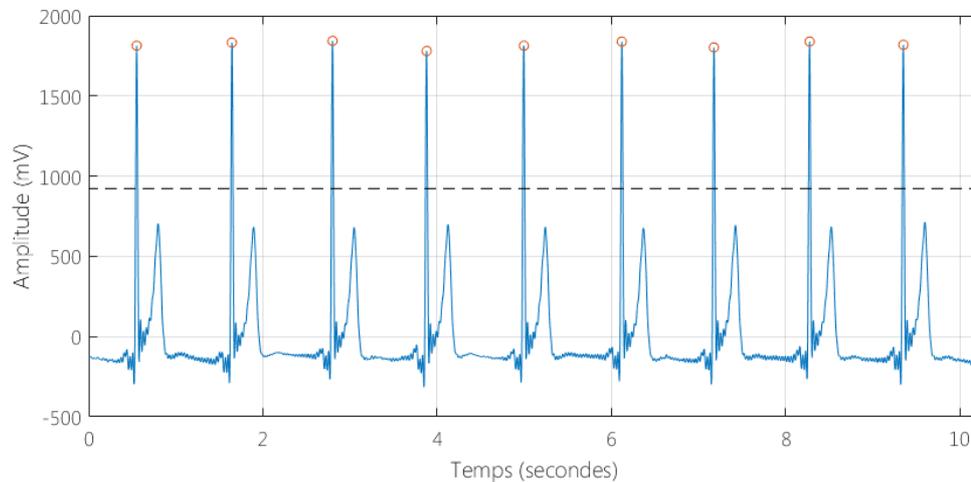


Figure 47 : Illustration de l'algorithme de détection de pics (*findpeaks*) sur Matlab. Le tracé bleu représente le signal ECG, le trait pointillé le seuil de détection et les cercle orange les pics N détectés.

2.3.3. Traitement des données oculométriques

Le prétraitement des données oculaires a été réalisé sur Matlab et consistait à sélectionner les segments correspondant à chacune des tâches de lectures pour les enregistrer dans des fichiers différents. Les données ont ensuite été traitées grâce au logiciel Ogama (Voßkühler, Nordmeier, Kuchinke, & Jacobs, 2008), permettant de calculer le nombre de fixations, la longueur des saccades et le nombre de régressions (Figure 48).

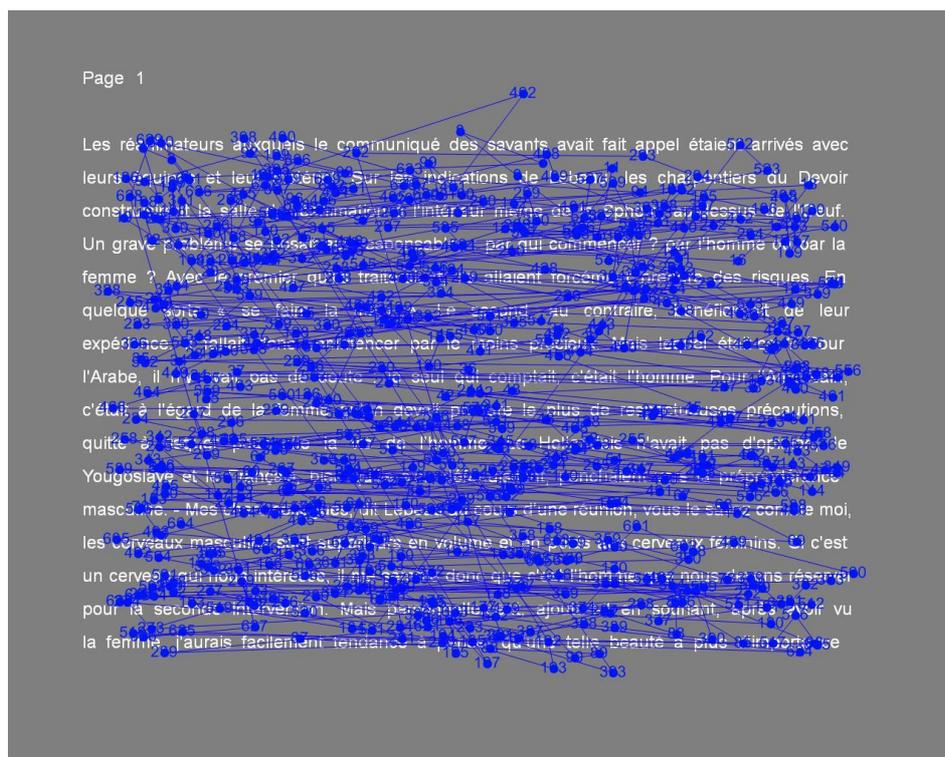


Figure 48 : Illustration du calcul des fixations et saccades sur le logiciel Ogama lors de la tâche de lecture

2.3.4. Analyses statistiques

Toutes les données ont été analysées avec Statistica10©. Un test de Kolmogorov-Smirnov a été réalisé pour déterminer si les données suivaient une distribution normale. Pour les données normalement distribuées, une ANOVA à un facteur (Conditions sonores [Bruit brut, Bruit filtré tonalités, Bruit filtré hautes-fréquences, Bruit filtré basses-fréquences, Filtre isophonique]) a été réalisée. Des ANOVA 3 x 6 à mesures répétées ont été réalisées, pour évaluer l'impact du temps et des conditions sonores sur les trois dimensions du SSSQ : le stress, l'engagement dans la tâche et l'inquiétude. Des Post-Hoc LSD ont été effectués pour analyser deux à deux les effets significatifs ($\alpha < 0,05$). Pour les données non-normalement distribuées, une analyse de Friedman non paramétrique a été effectuée. Des tests de Wilcoxon ont été utilisés pour analyser les effets intra-sujets.

Par la suite, certains résultats seront présentés sous forme de boîte à moustache. Le trait horizontal bleu représentera la médiane, la croix représentera la moyenne. Les bords de la boîte représenteront le 1^{er} quartile et le 3^{ème} quartile, ainsi la boîte indique que 50% des données sont comprises entre ces intervalles. Pour finir, les moustaches représenteront les valeurs extrêmes (minimum et maximum).

Les autres résultats seront présentés sous forme de moyenne dont les barres d'erreurs représenteront l'intervalle de confiance à 95 %.

Des corrélations non paramétriques de rangs de Spearman ont été réalisées entre les données démographiques et descriptives des participants et les performances comportementales et subjectives des tâches.

2.4. ETUDE COMPLEMENTAIRE : IMPACT D'UN BRUIT D'HELICOPTERE FLUCTUANT

Etant donné le caractère particulièrement délétère des sons fluctuants mis en évidence dans la littérature (Szalma & Hancock, 2011), nous avons mené une expérience complémentaire afin de tester l'effet d'un tel bruit sur les performances cognitives. Nous avons également voulu investiguer un autre aspect de la cognition : la vigilance. Cependant, l'effet du bruit sur la vigilance est particulier, il peut ainsi avoir un effet excitateur et améliorer les niveaux de vigilance (Hockey, 1970 ; Lundberg & Frankenhaeuser, 1978 ; Szalma & Hancock, 2011). Ainsi, une nouvelle tâche de vigilance, la tâche de l'horloge (Mackworth, 1950), a été introduite en remplacement de la tâche de repos, qui a été exclue de cette étude n'étant pas une tâche cognitive. Les tâches de « travail » et de « lecture » étaient identiques aux précédentes à l'exception de certains points qui seront développés dans les parties suivantes. Les trois tâches étaient réalisées durant une unique expérience cette fois-ci. Les ajustements apportés aux tâches étaient en partie faits pour réduire la durée de l'expérience.

La tâche de l'horloge a été inventée par Mackworth (1950). Sur une horloge de 100 unités, les participants devaient surveiller et indiquer à l'expérimentateur lorsque la « trotteuse » sautait deux unités au lieu d'une. Cette expérience a été l'une des premières à mettre en évidence le déficit attentionnel dû à une concentration continue sur une tâche monotone. Une baisse de vigilance dans cette tâche est attendue et considérée comme normale. Cette tâche a depuis été largement reprise et révisée par les chercheurs. Ainsi Lichtstein et al. (2000) ont établi le nombre de sauts égal à 10% du nombre de points présentés lors de la tâche, contrairement aux 50 % de la tâche initiale.

Une étude de Broadbent (1953) a montré que les performances lors d'une tâche de vigilance simple (tâche de l'horloge de Mackworth, 1950) pouvaient être détériorées par un bruit régulier mais pas par un bruit irrégulier. Broadbent explique ce résultat par un manque d'attention. Une autre étude (Kirk & Hecht, 1963) sur la même tâche de vigilance a été réalisée avec trois conditions sonores : un bruit constant, un bruit variable, tous deux présentés à 64 dB et une condition calme (61

dB). Les résultats montrent que la probabilité de détection des sauts est supérieure durant le bruit variable, aucune différence significative n'a été mise en évidence pour les deux autres conditions. Une autre étude avec différents niveaux sonores montrent également que les performances de cette tâche n'étaient pas impactées (Jerison, 1957). Ces résultats suggèrent que les bruits fluctuants et intermittents vont améliorer les performances de vigilance lors d'une tâche monotone.

2.4.1. Matériel

Durant cette étude complémentaire, plus exploratoire, le matériel a différé des études précédentes. En effet, elle a été réalisée en parallèle des trois premières expériences, donc les moyens d'essais n'étaient pas disponibles. Ainsi, l'expérience a eu lieu dans une salle expérimentale et non dans le tronçon VASCO par convenance.

Les données ECG des participants ont été mesurées grâce à un Faros 360 à trois électrodes (Figure 49). Les données ont été enregistrées à une fréquence de 512 Hz sous un format *edf* directement dans la mémoire interne du Faros. Les marqueurs de début et fin de tâches étaient signalés par un appui long sur le bouton principal du boîtier du Faros.

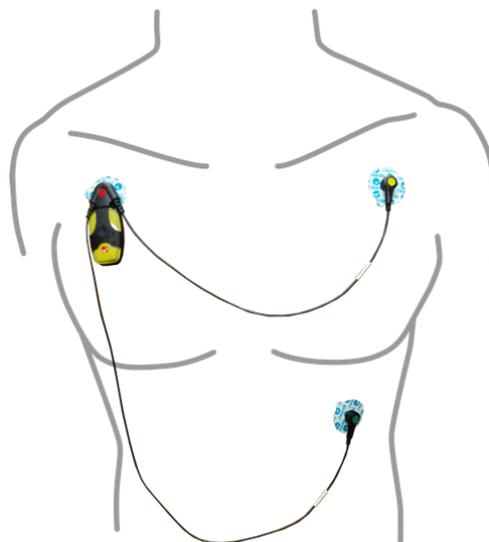


Figure 49 : Placement des trois électrodes du Faros360

Un casque audio Razer (Tiamat 7.1 V2) directement relié à l'ordinateur expérimental a été utilisé durant cette expérience. Ce dernier a été utilisé à la place du casque AKG K812 qui n'était pas disponible. De plus, ses réponses fréquentielles n'ont pas été analysées pour simplifier le protocole. Il possède une réponse en fréquence de 20 à 20000 Hz et une efficacité de 118 dB(SPL).

2.4.2. Conditions sonores

Trois conditions sonores étaient utilisées durant cette expérience. La première condition sonore correspondait à la condition de bruit d'hélicoptère stationnaire et reprenait le signal brut déjà utilisé dans les expériences précédentes. La deuxième condition sonore correspondait à un bruit d'hélicoptère fluctuant. Pour créer ce bruit fluctuant nous avons utilisé un signal d'hélicoptère provenant de la base de données audio de la BBC (<http://bbcsfx.acropolis.org.uk/?q=helicopter>) sous licence *RemArc* permettant une utilisation à des fins de recherche. La troisième condition était une condition de silence. Le signal fluctuant représentait l'enregistrement du bruit en cabine du démarrage, du décollage et de l'atterrissage d'un hélicoptère avec une durée initiale de 5 minutes. Cependant pour augmenter le degré de fluctuations de ce bruit, nous avons sélectionné certaines parties (décollage et atterrissage) du signal que nous avons répétées deux fois. Le signal était ensuite généré en boucle, permettant de disposer de 4 décollages et 3 atterrissages sur un laps de temps de 5 minutes 30 secondes, correspondant aux durées des tâches. Les spectres temporel et fréquentiel de ce bruit sont présentés dans les Figure 50 et Figure 51.

Les deux conditions avec bruit ont été contrôlées à un niveau sonore de 80 dB(A) en sortie de casque.

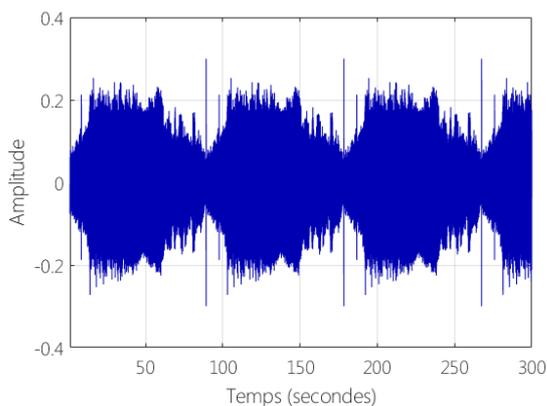


Figure 50 : Spectre temporel du bruit d'hélicoptère fluctuant utilisé lors de l'étude complémentaire

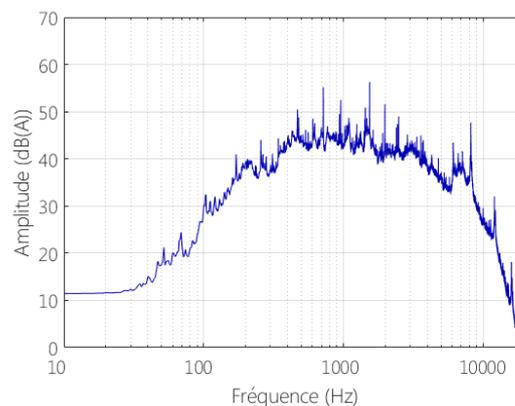


Figure 51 : Spectre fréquentiel du bruit d'hélicoptère fluctuant utilisé lors de l'étude complémentaire

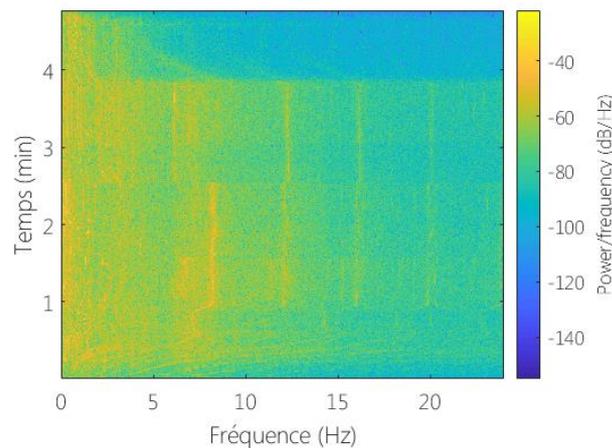


Figure 52 : Analyse temps-fréquence du bruit fluctuant de l'étude complémentaire

2.4.3. Tâche TNT

La *Toulouse N-back Task* (TNT ; développé à la partie 2.2.3.1 p.98) a été de nouveau utilisée dans cette expérience. La tâche était en tous points identique à l'exception que cette fois-ci la difficulté 1-back était également réalisée. Pour cette difficulté (1-back) les participants devaient comparer les résultats de l'opération en cours à celui obtenu à l'opération précédente. Ainsi les participants réalisaient les trois difficultés. Cependant le nombre de présentation des blocs de difficultés a dû être réduit à deux durant cette étude pour garder une durée totale de 5 min 30 s.

2.4.4. Tâche de lecture

La tâche de lecture était également la même que lors de la Tâche 2 de lecture (partie 2.2.3.2, p.102). Cependant seuls trois des textes originaux ont été sélectionnés et ces derniers ont été raccourcis à 4 pages pour réduire la durée de lecture et de ce fait la durée de l'expérience. Les questions de compréhension présentées à la fin de la tâche de lecture étaient également les mêmes. Les données oculométriques n'ont pas été mesurées durant cette tâche, ainsi seuls les temps de lecture ont été analysés comme données comportementales.

2.4.5. Tâche de vigilance : l'horloge

La tâche de l'horloge a été implémentée sur Matlab 2018b. Dans cette tâche le cadran correspond à un grand cercle composé de 60 points. Un point étant

représenté par un petit cercle noir (Figure 53). La « trotteuse » est représentée par un point rouge à l'intérieur des cercles. Dans notre version la trotteuse passait exactement 0,8 seconde sur un point au lieu de 1 seconde initialement. Le nombre de sauts correspondait à un rapport de 10% du nombre de points « joués » durant la tâche. Pour que la tâche dure 5 minutes, il était nécessaire de « jouer » 360 points, ce qui correspondait à 36 sauts aléatoirement répartis. La répartition aléatoire des sauts imposait deux contraintes. La première était qu'il ne devait pas y avoir de sauts sur les deux premiers et derniers points de la tâche, sinon le risque était que les participants n'aient pas le temps de les voir ou de répondre. La deuxième contrainte était que les sauts ne pouvaient se succéder sans avoir un minimum de deux points entre eux.

Les participants avaient pour consigne de rester vigilant et de signaler les sauts de point en appuyant sur la barre espace du clavier. Le saut était considéré comme détecté si le participant appuyait dans un intervalle de 2 secondes après le saut, sinon il était considéré comme manqué.

Ainsi, les données recueillies durant cette tâche étaient le nombre de sauts détectés, le nombre de sauts manqués, les fausses alarmes (les appuis clavier alors qu'il n'y avait pas de saut) et les temps de réaction.

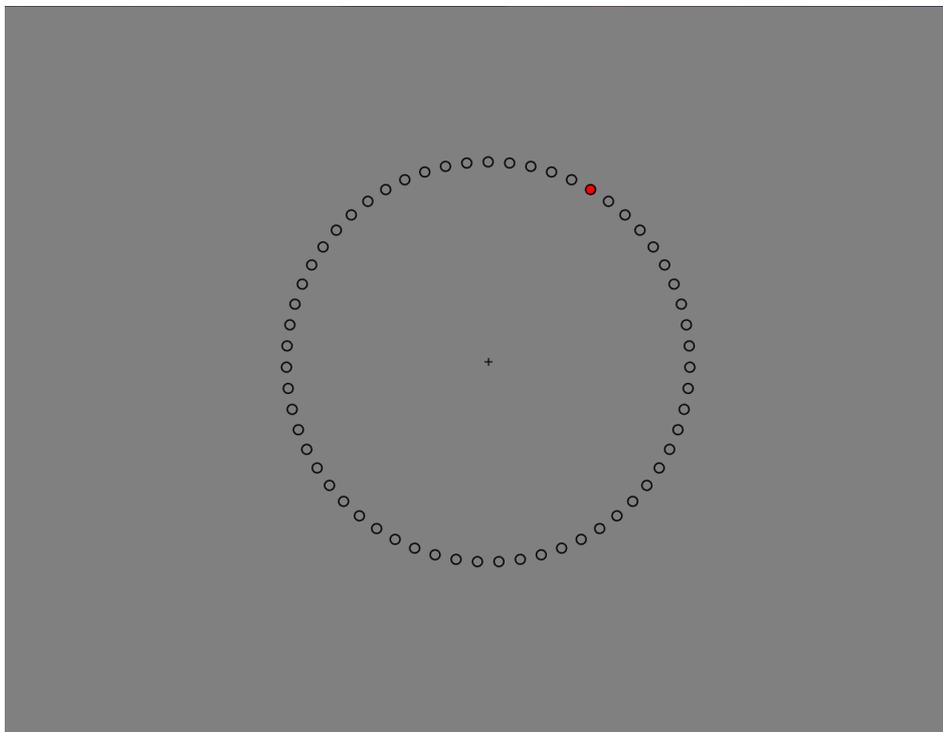


Figure 53 : Capture d'écran lors de la réalisation de la tâche de l'horloge

2.4.6. Procédure

La procédure suivie lors de cette expérience était la suivante :

- Signature de la notice d'information et du consentement éclairé ;
- Réalisation d'un audiogramme ;
- Remplissage de questionnaires :
 - o Questionnaire d'informations démographiques (âge, niveau d'étude, heures de sommeil, etc.) ;
 - o Questionnaire de sensibilité au bruit (NSS-SF) ;
 - o Questionnaire d'habitude d'écoute et d'environnement sonore ;
 - o Test de personnalité (EPQR-A) ;
- Pause des électrodes ECG du Faros ;
- Présentation orale des consignes pour la suite de l'expérience ;
- Pause du casque audio
- Instructions écrites et entraînement à la TNT ;
- Instructions écrites et entraînement à la tâche de l'horloge ;
- Début de la tâche (TNT, lecture ou horloge) x 3 conditions (Figure 50) ;

Les conditions sonores ainsi que les tâches étaient contrebalancées de telle sorte qu'une condition sonore et qu'une tâche ne pouvaient pas être lancée deux fois de suite.

Les participants devaient signaler eux-mêmes le début et la fin d'une tâche en appuyant 2 secondes sur le bouton principal du boîtier. L'expérience durait en tout environ 1h15.

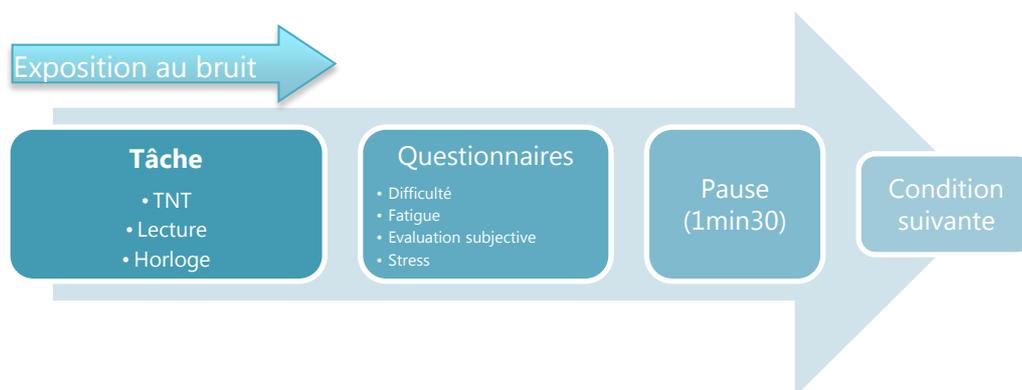


Figure 54: Procédure suivie pour chaque condition sonore de l'étude complémentaire

3.

RESULTATS

3.1. TACHE 1 DE « TRAVAIL » : TOULOUSE N-BACK TASK

Le but de cette expérience était d'analyser l'impact de différents filtrages de bruit interne d'hélicoptère sur les performances cognitives des participants. La tâche utilisée, la Toulouse N-back Task (TNT), devait simuler une tâche de « travail ». Au cours de celle-ci, les participants devaient calculer, mémoriser et comparer les résultats d'opérations arithmétiques avec les résultats de précédentes opérations. Deux niveaux de difficulté étaient présentés : le 0-back, considéré comme une condition facile et le 2-back, considéré comme une condition difficile. Différentes mesures ont été recueillies durant cette expérience, le ressenti subjectif à l'aide de questionnaires, les performances à la tâche et des mesures physiologiques (EEG et ECG) afin d'évaluer objectivement la charge cognitive des participants.

3.1.1. Résultats subjectifs de la TNT

Les résultats subjectifs analysés dans cette étude étaient la difficulté ressentie, le niveau de fatigue ressentie, le niveau de stress évalué grâce au SSSQ, la perception subjective des conditions sonores et la comparaison par paires des bruits.

Difficulté ressentie

L'analyse de la difficulté subjective révèle un effet significatif du temps pour la condition 2-back [$F(5,95) = 3.64, p < 0,01$]. La performance à la tâche de 2-back a été jugée de plus en plus facile au fil du temps, c'est-à-dire selon l'ordre de présentation des six conditions de la tâche, indépendamment du type de son (Figure 55). Ce résultat n'est pas tout à fait significatif en 0-back, il a été jugé aussi facile tout au long des six passations [$F(5,95) = 2.16, p = 0.06$; Figure 55]. Même si la condition de silence est associée en moyenne au niveau de difficulté ressentie le plus faible, l'analyse de la difficulté ressentie en fonction des conditions sonores ne donne pas de résultat significatif [0-back : $F(5,95) = 1.65, p = 0.15$; 2-back : $F(5,95) = 1.65, p = 0.15$; Figure 55].

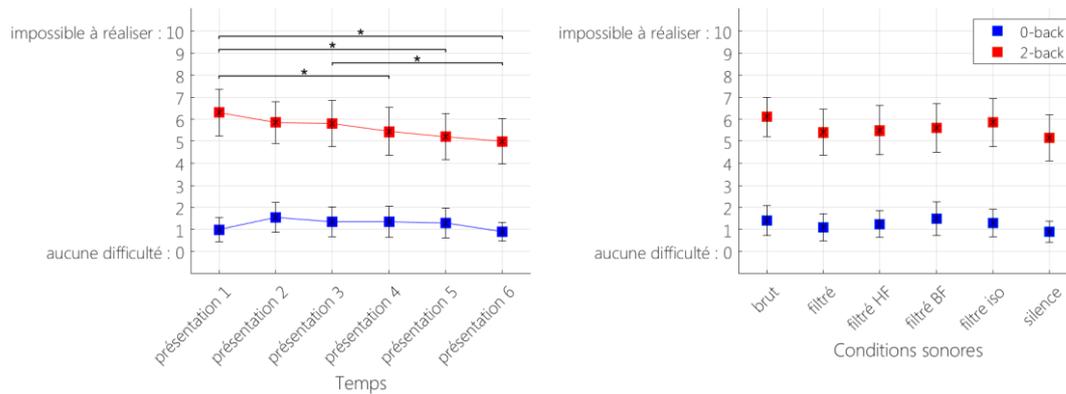


Figure 55: Difficulté subjective de la TNT pour le 0-back (en bleu) et le 2-back (en rouge) en fonction du temps (à gauche) et en fonction des conditions sonores (à droite).

Niveau de fatigue ressentie

L'analyse du niveau de fatigue subjective montre un effet significatif du temps [$F(6,114) = 3.48, p < 0.01$], les participants se sont sentis plus fatigués au fur et à mesure des répétitions de la réalisation de la tâche (Figure 56). Ce niveau de fatigue, une fois reporté en fonction des conditions sonores, ne montre pas d'effet significatif [$F(5,95) = 0.42, p = 0.83$] : les participants ne se sont pas sentis plus ou moins fatigués en fonction du bruit (Figure 56).

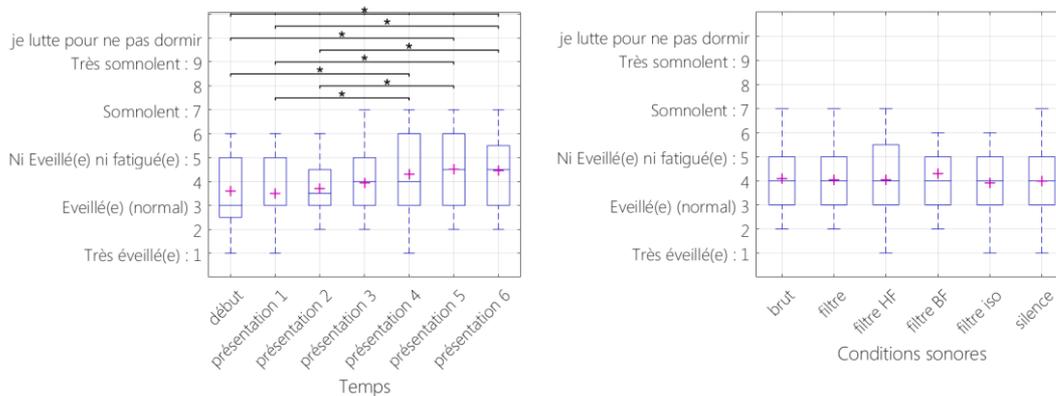


Figure 56: Fatigue subjective à la TNT en fonction du temps (à gauche) et en fonction des conditions sonores (à droite)

Résultats du SSSQ

L'analyse des trois dimensions du SSSQ en fonction du temps a révélé un effet principal significatif des dimensions en fonction du temps [$F(2,38) = 123.86, p < 0.01, \eta_p^2 = 0.87$]. Le test Post-Hoc LSD a montré que la dimension de l'engagement était plus élevée que le niveau de stress et l'inquiétude. L'analyse a également révélé un effet principal du temps [$F(5,95) = 15.85, p < 0.01, \eta_p^2 = 0.45$], montrant que

globalement les dimensions du SSSQ durant les deux premières passations ont été évaluées de manière plus élevées que toutes les autres ($p < 0.05$). Finalement, l'interaction entre le temps et les trois dimensions du SSSQ a révélé un effet significatif [$F(10,190) = 6.10, p < 0.01, \eta_p^2 = 0.24$]. Le test Post-Hoc LSD a montré que l'inquiétude était plus importante durant les deux premières passations comparées à toutes les autres ($p < 0.01$; Figure 57).

L'analyse des trois dimensions du SSSQ en fonction des conditions sonores n'a pas révélé d'effet principal significatif des conditions sonores [$F(5,95) = 1.14, p = 0.34, \eta_p^2 = 0.06$]. L'interaction des trois dimensions avec les conditions sonores n'a également pas présenté d'effet significatif [$F(10,190) = 1.45, p = 0.16, \eta_p^2 = 0.07$; Figure 58].

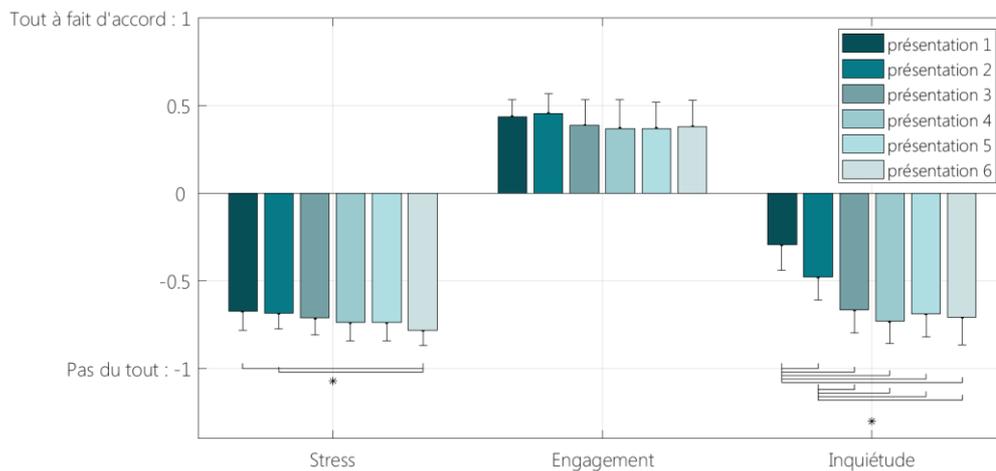


Figure 57 : Dimensions du SSSQ en fonction du temps durant la TNT.

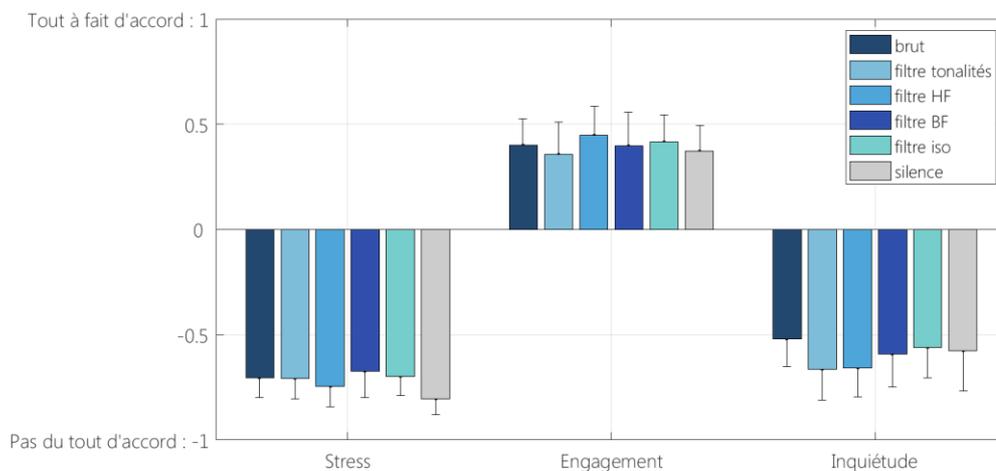


Figure 58 : Dimensions du SSSQ en fonction des conditions sonores durant la TNT.

Evaluation subjective des conditions sonores

L'analyse de l'évaluation subjective des différents bruits a montré un effet significatif des conditions sonores sur chacun des termes utilisés, le Tableau 9 résume ces résultats. Il a ainsi été montré sans surprise que la condition silencieuse a été significativement jugée plus basse. De plus, le bruit filtré en basses fréquences a été jugé plus intense et plus stressant que le bruit filtré sur les tonalités et le bruit filtré en haute-fréquence. Ce résultat peut être expliqué par les tonalités hautes-fréquences restantes dans ce bruit. Le bruit brut a été perçu plus agaçant que tous les autres bruits et plus fatigant que le bruit filtré sur toutes les tonalités et le bruit filtré en hautes-fréquences.

*Tableau 9 : Résumé des résultats de l'évaluation subjective des conditions sonores sur la TNT avec la moyenne \pm écart-type. La condition 2 représente le bruit filtré sur toutes les tonalités. HF = hautes-fréquences, BF = basses-fréquences. Les * représentent un test de Wilcoxon significatif avec les conditions en exposant*

	1 : Brut	2 : Filtre tonalités	3 : Filtre HF	4 : Filtre BF	5 : Isophonique	6 : Silence
Intensité	5.3 \pm 0.8	5.0 \pm 1.2	4.8 \pm 1.3	5.6 \pm 1.1 * ^{2,3}	5.2 \pm 1.1	1.0 \pm 0.0 * ^{1,2,3,4,5}
Grave	4.0 \pm 1.5	4.2 \pm 1.5	4.2 \pm 1.3	4.3 \pm 1.4	4.7 \pm 1.5	1.0 \pm 0.0 * ^{1,2,3,4,5}
Medium	4.6 \pm 0.7	5.0 \pm 1.0	4.6 \pm 1.2	5.0 \pm 1.4	4.4 \pm 1.5	1.1 \pm 0.4 * ^{1,2,3,4,5}
Aigu	4.3 \pm 1.7	3.6 \pm 1.6	3.9 \pm 1.6	4.2 \pm 1.8	4.2 \pm 2.1	1.0 \pm 0.0 * ^{1,2,3,4,5}
Tonal	3.8 \pm 2.2	3.4 \pm 2.2	4.2 \pm 1.9	3.9 \pm 1.9	3.9 \pm 1.9	1.0 \pm 0.0 * ^{1,2,3,4,5}
Fluctuation	2.9 \pm 1.3	2.6 \pm 1.4	3.1 \pm 1.7	2.9 \pm 1.2	3.9 \pm 1.8 * ^{2,4}	1.2 \pm 0.7 * ^{1,2,3,4,5}
Distraction	3.4 \pm 1.5	3.1 \pm 1.6	2.8 \pm 1.5	3.1 \pm 1.7	3.2 \pm 1.5	1.0 \pm 0.0 * ^{1,2,3,4,5}
Agacement	4.2 \pm 1.6 * ^{2,3,5}	3.3 \pm 1.6	3.3 \pm 1.9	3.6 \pm 1.7	3.4 \pm 1.6	1.0 \pm 0.0 * ^{1,2,3,4,5}
Fatigant	4.1 \pm 1.7 * ^{2,3}	3.4 \pm 1.7	3.2 \pm 2.0	3.5 \pm 1.9	3.3 \pm 1.7	1.0 \pm 0.0 * ^{1,2,3,4,5}
Habituation	4.4 \pm 1.6	4.7 \pm 1.7	5.0 \pm 1.4	4.6 \pm 1.8	4.5 \pm 1.7	1.9 \pm 2.2 * ^{1,2,3,4,5}
Stressant	2.6 \pm 1.3	2.5 \pm 1.6	2.4 \pm 1.3	3.2 \pm 1.8 * ^{2,3}	2.6 \pm 1.7	1.0 \pm 0.0 * ^{1,2,3,4,5}

Comparaisons par paires des conditions sonores

Les comparaisons par paires avaient pour but de confronter les différents bruits d'hélicoptère afin d'identifier les plus dérangeants par rapport aux autres. Les résultats montrent qu'il y a un effet significatif des conditions sonores [$\chi^2(4) = 61.96$, $p < 0.01$; Figure 59]. Le bruit brut (original) a été le plus souvent choisi par les participants comme étant le bruit le plus dérangeant, suivi du filtre basses-fréquences et du filtre hautes-fréquences. Seuls le bruit filtré sur toute les tonalités et le bruit filtré isophoniquement n'ont pas été jugé significativement différents.

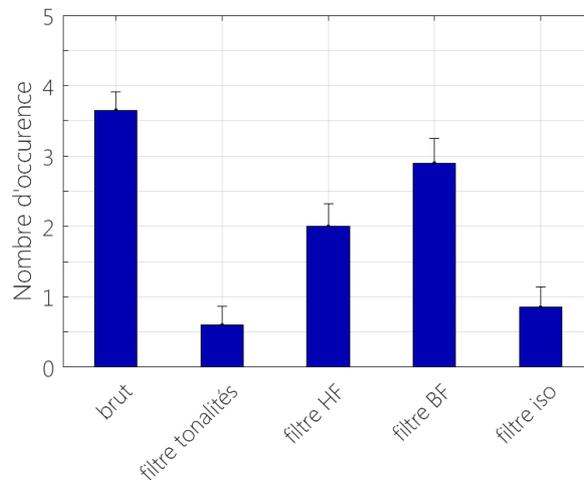


Figure 59 : Graphique représentant les résultats des comparaisons par paires ayant pour but de définir le bruit le plus dérangerant durant la TNT

3.1.2. Résultats comportementaux : performances de la TNT

Nous avons analysé les performances obtenues lors de la TNT. Les performances mesurées étaient le nombre de bonnes et mauvaises réponses et les temps de réaction lorsque les participants répondaient juste (temps de réaction pour les bonnes réponses uniquement).

Nombre de réponses correctes

Concernant le nombre de réponses correctes, les participants ont réalisé plus de bonnes réponses lors de la condition 0-back que la condition 2-back. De plus il y avait un effet significatif du temps sur le 2-back [0-back : $F(5,95) = 1.97, p = 0.09, \eta_p^2 = 0.09$; 2-back : $F(5,95) = 13.69, p < 0.01, \eta_p^2 = 0.42$]. Les participants se sont améliorés au fil des répétitions pour la condition 2-back alors que la performance est restée stable en 0-back (Figure 59). Il n'y avait pas d'effet significatif en fonction des conditions sonores [0-back : $F(5,95) = 0.77, p = 0.58, \eta_p^2 = 0.04$; 2-back : $F(5,95) = 1.39, p = 0.23, \eta_p^2 = 0.07$].

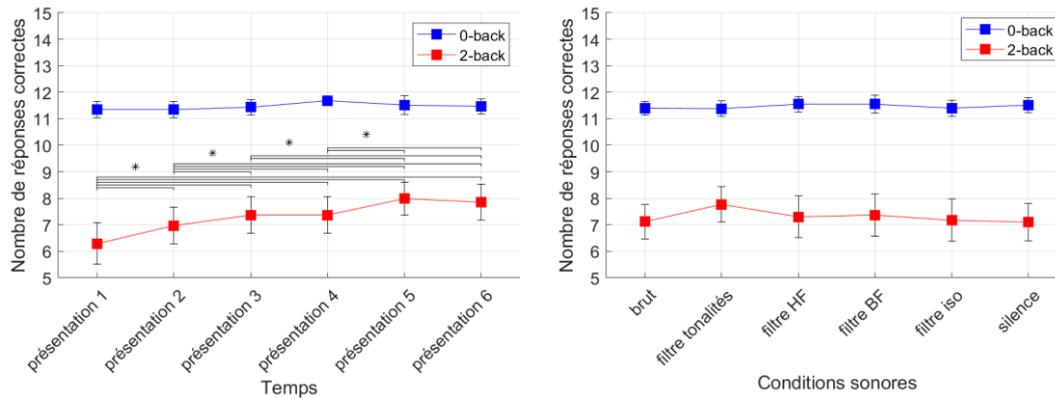


Figure 60: Nombre de réponses correctes sur la tâche TNT en fonction du temps (à gauche) et en fonction des conditions sonores (à droite)

Nombre d'erreurs

Concernant le nombre d'erreurs, il n'y avait pas d'effet significatif du temps sur le nombre de mauvaises réponses [0-back : $F(5,95) = 1.35$, $p = 0.25$, $\eta_p^2 = 0.07$; 2-back : $F(5,95) = 2.05$, $p = 0.08$, $\eta_p^2 = 0.10$]. De même, il n'y avait pas d'effet significatif des conditions sonores sur le nombre de mauvaises réponses [0-back : $F(5,95) = 1.63$, $p = 0.16$, $\eta_p^2 = 0.08$; 2-back : $F(5,95) = 1.32$, $p = 0.26$, $\eta_p^2 = 0.07$].

Temps de réaction

Concernant les temps de réaction, il y avait un effet significatif du temps pour les deux difficultés [0-back : $F(5,95) = 5.68$, $p < 0.01$, $\eta_p^2 = 0.23$; 2-back : $F(5,95) = 4.65$, $p < 0.01$, $\eta_p^2 = 0.07$]. Les participants répondaient plus rapidement au fur et à mesure des répétitions de la tâche (Figure 61). Il n'y avait pas d'effet significatif des conditions sonores [0-back : $F(5,95) = 0.25$, $p = 0.94$, $\eta_p^2 = 0.01$; 2-back : $F(5,95) = 0.61$, $p = 0.69$, $\eta_p^2 = 0.03$], aucune des conditions n'a accéléré ou ralenti les temps de réaction des participants.

Ces résultats montrent qu'il y a un effet du temps, qui se traduit par une amélioration des performances à la TNT au fil de l'expérience. On peut interpréter ce résultat comme un entraînement à la tâche plutôt que comme une habitude aux sons. Ceci est d'autant plus vraisemblable qu'il n'y a pas eu d'effet de la condition sonore sur les performances des participants, y compris considérant la comparaison bruit en général (quel que soit le type de bruit) et silence.

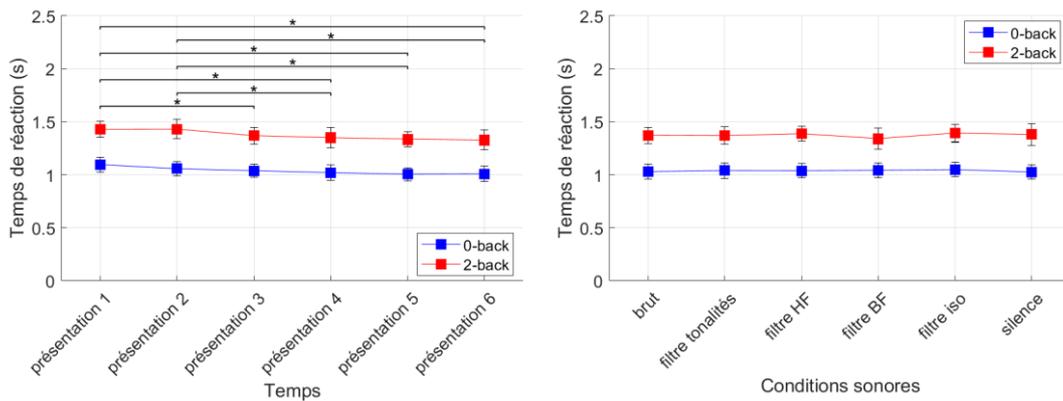


Figure 61: Temps de réactions lors de la tâche TNT en fonction du temps (à gauche) et en fonction des conditions sonores (à droite)

3.1.3. Résultats psychophysiques de la TNT

Les mesures psychophysiques analysées durant cette étude étaient les bandes thêta, alpha et gamma de l’EEG, l’indice TLI EEG, le rythme cardiaque et sa variabilité.

EEG

Concernant l’analyse des données EEG, des moyennes sur plusieurs clusters d’électrodes ont été réalisées sur différentes bandes de fréquences (thêta, alpha et gamma).

Thêta

La puissance du rythme thêta en région frontale n’a pas présenté ni d’effet significatif du temps [$\chi^2(5) = 8.60, p = 0.13$], ni d’effet significatif des conditions sonores [$\chi^2(5) = 7.22, p = 0.20$].

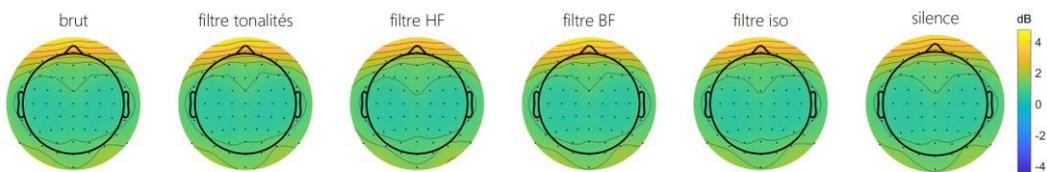


Figure 62 : Cartes topographiques de la puissance du rythme thêta en fonction des conditions sonores durant la tâche TNT

Alpha

La puissance du rythme alpha en région pariéto-occipitale a montré un effet significatif du temps [$\chi^2(5) = 39.94, p < 0,01$; Figure 63]. Les résultats des comparaisons deux à deux ont montré que la puissance du rythme alpha

augmentait en fonction du temps, la puissance étant significativement plus élevée sur les trois dernières passations que les trois premières ($p < 0.05$). Les résultats ont montré qu'il n'y a pas d'effet significatif des conditions sonores sur le rythme alpha [$\chi^2(5) = 9.40$ $p = 0.09$; Figure 64].

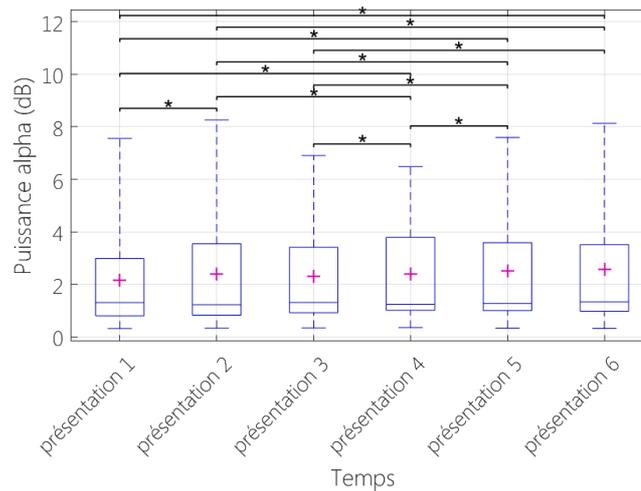


Figure 63 : Puissance du rythme alpha sur la région pariéto-occipitale en fonction du temps durant la tâche TNT

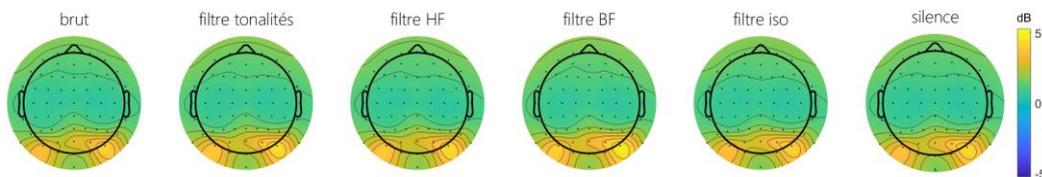


Figure 64 : Cartes topographiques de la puissance du rythme alpha en fonction des conditions sonores durant la tâche TNT

Gamma

La puissance du rythme gamma en région frontale a montré un effet significatif du temps [$\chi^2(5) = 12.37$, $p < 0,05$; Figure 65]. Les résultats des comparaisons deux à deux ont montré une diminution de la puissance au court du temps ($p < 0.05$). Les résultats ont montré qu'il n'y a pas d'effet significatif des conditions sonores sur le rythme gamma en région frontale [$\chi^2(5) = 1.71$, $p = 0.89$; Figure 66].

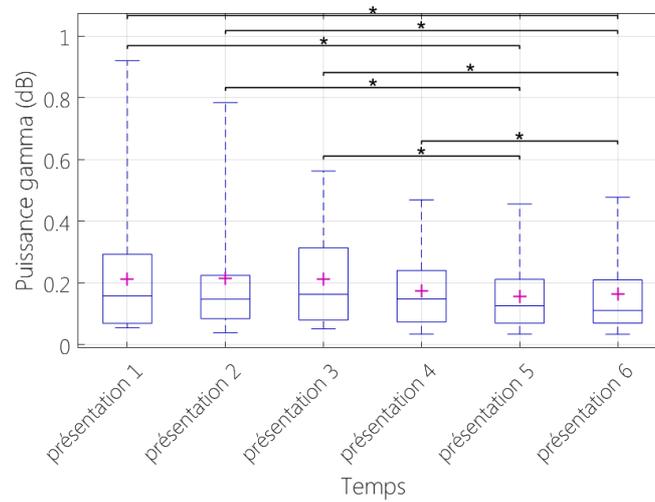


Figure 65 : Puissance du rythme gamma sur la région frontale en fonction du temps durant la tâche TNT

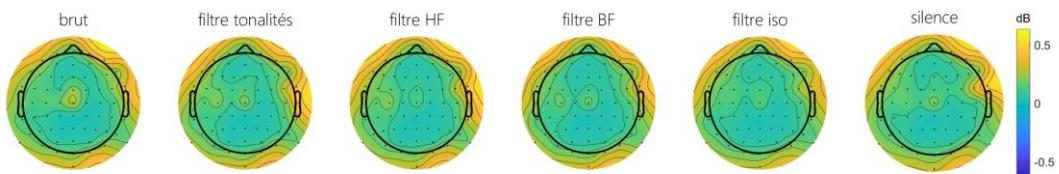


Figure 66 : Cartes topographiques de la puissance du rythme gamma en fonction des conditions sonores durant la tâche TNT

TLI

L'analyse de la charge cognitive via le ratio TLI a montré un effet significatif du temps [$\chi^2(5) = 14.69, p < 0.05$; Figure 67]. L'analyse en fonction des conditions sonores n'a révélé qu'une tendance [$\chi^2(5) = 10.60, p = 0.06$; Figure 68].

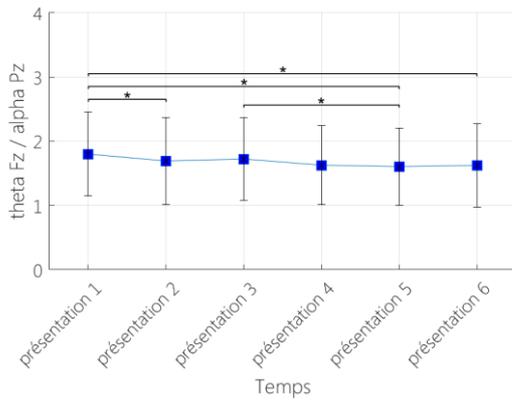


Figure 67 : Indice de charge cognitive TLI en fonction du temps durant la tâche TNT

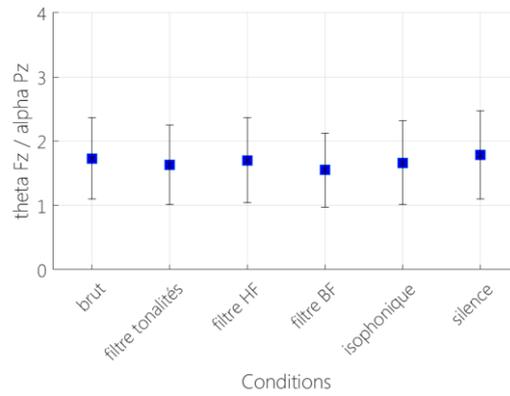


Figure 68 : Indice de charge cognitive TLI en fonction des conditions sonores durant la tâche TNT

ECG

Pour évaluer l'activité cardiovasculaire nous avons analysé le rythme cardiaque (BPM) et sa variabilité par l'utilisation de la métrique NN50.

BPM

L'analyse du rythme cardiaque montre un effet significatif du temps [$F(5,95) = 8.98, p < 0.01, \eta_p^2 = 0.32$; Figure 69], le rythme cardiaque a ralenti au court de l'expérience. L'analyse n'a pas montré d'effet significatif des conditions sonores [$F(5,95) = 0.69, p = 0.64, \eta_p^2 = 0.3$]. Cependant, on peut souligner le fait que la moyenne du rythme sur toutes les conditions bruyantes ($M = 76.26 \pm 12.39$) était significativement plus élevée qu'en condition silencieuse ($M = 75.52 \pm 11.27$) [$t(19) = 24.21, p < 0.01$; Figure 70].

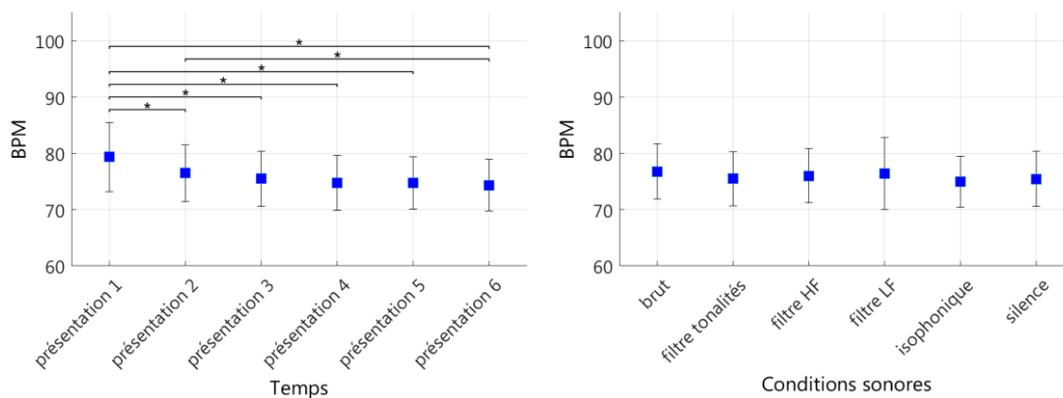


Figure 69 : Battements par minutes durant la TNT en fonction du temps (à gauche) et en fonction des conditions sonores (à droite)

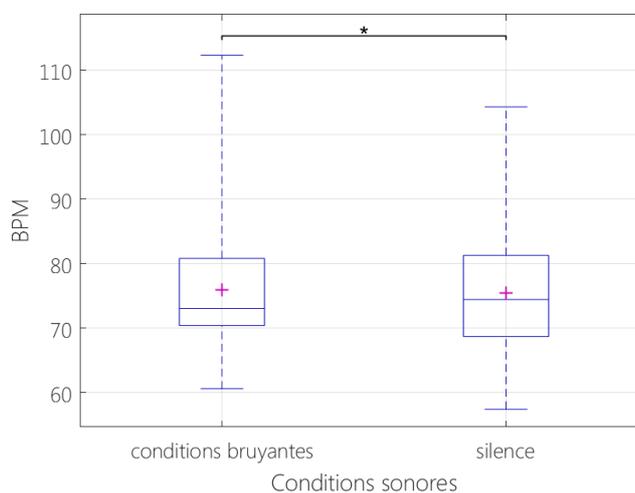


Figure 70 : Rythme cardiaque moyenné sur l'ensemble des conditions bruyantes vs le silence durant la TNT

NN50

L'analyse de la HRV via l'indice de NN50 montre un effet significatif du temps [$F(5,95) = 2.38, p < 0.05, \eta_p^2 = 0.11$], l'indice NN50 a augmenté en fonction du temps (Figure 71). Le test Post-Hoc LSD a révélé que la première passation était associée à une variabilité plus faible que toutes les autres passations ($p < 0.05$). L'analyse n'a pas révélé d'effet significatif des conditions sonores [$F(5,95) = 0.38, p = 0.86, \eta_p^2 = 0.02$; Figure 72].

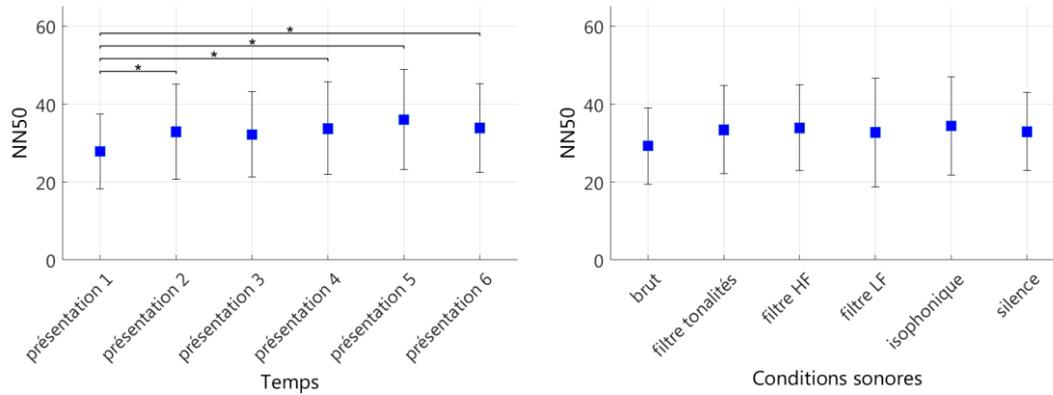


Figure 71 : Indice du NN50 durant la TNT en fonction du temps (à gauche) et en fonction des conditions sonores (à droite)

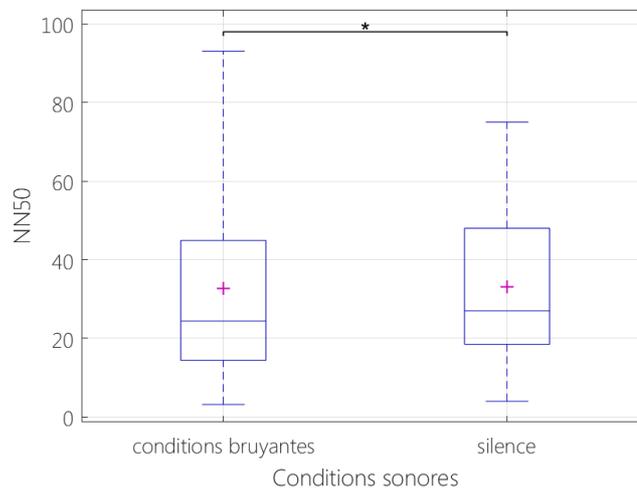


Figure 72 : Indices NN50 moyennés sur l'ensemble des conditions bruyantes vs silence durant la tâche TNT

3.1.4. Résultats des corrélations de la TNT

Le tableau suivant (Tableau 10) présente les statistiques descriptives de la personnalité des participants. Les résultats des corrélations n'ont pas montré de résultats particulièrement significatifs en fonction des performances. Le Tableau 18 (Annexe 3, p.223) résume ces résultats. Cependant, on peut noter une corrélation positive entre la difficulté ressentie en 2-back et les personnes extraverties (Tableau 19, p.225).

Tableau 10 : Statistiques descriptives de la personnalité du groupe de participants ayant réalisés la tâche 1 TNT

	Sensibilité au bruit	Neuroticisme	Extraversion
Moyenne	18.7	1.9	3.3
Ecart-type	4.6	1.2	2.1
Médiane	17.5	2	4

3.1.5. Résumé des résultats de la TNT

Les principaux résultats de cette étude montrent qu'il y a un effet du temps sur globalement toutes les métriques analysées. Concernant les résultats subjectifs, la fatigue a été jugée plus importante au court de l'expérience et l'inquiétude a diminué en fonction du temps. Une amélioration de la difficulté ressentie et des performances au cours du temps peut être interprétée comme un entraînement à la tâche plutôt qu'à une habitude aux sons. Cependant, les données psychophysiologiques montrent également un effet du temps, se traduisant par une charge cognitive diminuée (diminution du rythme alpha et du TLI et augmentation du BPM et du NN50) et une diminution du niveau attentionnel (augmentation du rythme gamma).

Seul le ressenti subjectif a présenté un effet des conditions sonores, indiquant que le bruit brut était jugé comme le plus désagréable et agaçant suivi du bruit filtré en basses-fréquences. De plus, on peut remarquer que le rythme cardiaque durant les conditions bruyantes (toutes les conditions avec un bruit moyennées) était supérieur lorsqu'il était comparé au silence. Finalement, le seul résultat intéressant des corrélations avec la personnalité a montré que les personnes extraverties éprouaient plus de difficulté ressentie durant la difficulté 2-back.

3.2. TACHE 2 DE LECTURE

La tâche de lecture consistait en la lecture de 6 textes de tailles équivalentes. Les participants lisaient à leur rythme, sans contrainte de temps.

3.2.1. Résultats subjectifs de la tâche de lecture

Les résultats subjectifs analysés dans cette étude étaient la difficulté ressentie, le niveau de fatigue ressentie, le niveau de stress évalué grâce au SSSQ, la

perception subjective des conditions sonores et la comparaison par paires des bruits.

Difficulté ressentie

L'analyse de la difficulté subjective a montré qu'il n'y avait pas d'effet significatif du temps [$F(5,95) = 0.63, p = 0.67, \eta_p^2 = 0.03$; Figure 73], mais qu'il y avait un effet significatif des conditions sonores [$F(5,95) = 16.35, p < 0,01, \eta_p^2 = 0.31$]. La tâche a été perçue plus facile en condition silencieuse qu'en condition bruyante (Figure 74).

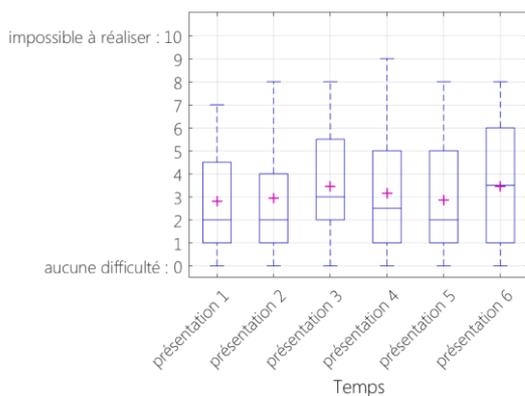


Figure 73 : Difficulté subjective durant la lecture en fonction du temps

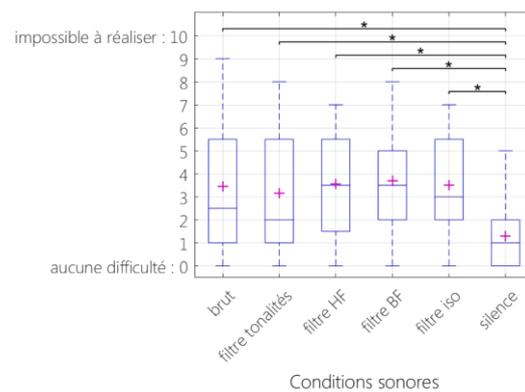


Figure 74 : Difficulté subjective durant la lecture en fonction des conditions

Niveau de fatigue ressentie

Les résultats ont montré qu'il y avait un effet significatif du temps sur la fatigue subjective [$F(5,95) = 3.24, p < 0.01, \eta_p^2 = 0.15$; Figure 75]. Les participants se sont sentis plus fatigués à partir de la 4^{ème} condition. Concernant les conditions sonores il n'y avait pas d'effet significatif [$F(5,95) = 0.81, p = 0.55, \eta_p^2 = 0.04$; Figure 75]. L'augmentation de la fatigue est donc vraisemblablement due aux répétitions de la tâche.

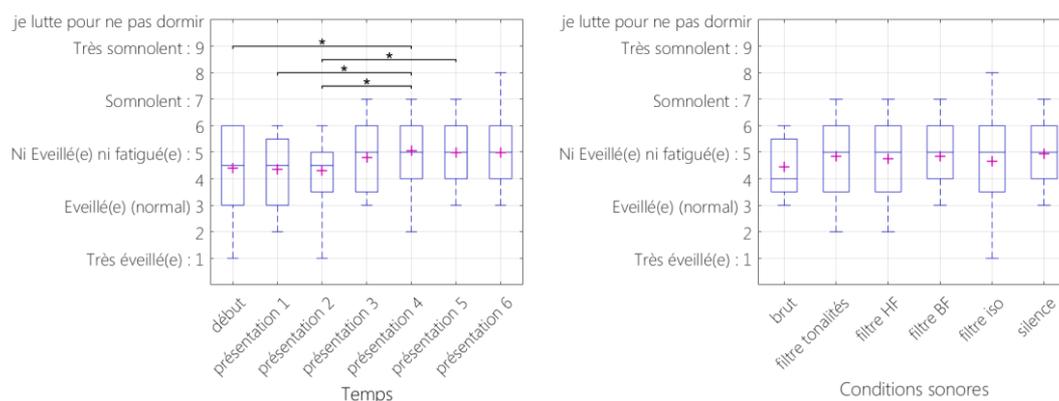


Figure 75: Fatigue subjective à la TNT en fonction du temps (à gauche) et en fonction des conditions sonores (à droite)

Résultats du SSSQ

L'analyse des trois dimensions du SSSQ a révélé un effet principal significatif des dimensions [$F(2,38) = 84.30, p < 0.01, \eta_p^2 = 0.82$]. L'analyse a également révélé un effet principal significatif du temps [$F(5,95) = 8.85, p < 0.01, \eta_p^2 = 0.32$]. Le test Post-Hoc LSD a montré que la première condition était la plus stressante et les deux dernières les moins stressantes. L'interaction entre le temps et les trois dimensions du SSSQ ont montré un effet significatif [$F(10,190) = 2.62, p < 0.01, \eta_p^2 = 0.12$]. Le test post-hoc LSD a montré que c'était la dimension de l'inquiétude qui était impactée par le temps, celle-ci décroît sur les trois premières conditions, puis se stabilise (Figure 76).

L'analyse des trois dimensions du SSSQ en fonction des conditions sonores n'a pas révélé d'effet principal significatif des conditions sonores [$F(5,95) = 0.87, p = 0.50, \eta_p^2 = 0.04$]. L'analyse de l'interaction entre les trois dimensions et les conditions sonores n'a également pas présenté d'effet significatif [$F(10,190) = 1.02, p = 0.43, \eta_p^2 = 0.05$; Figure 77].

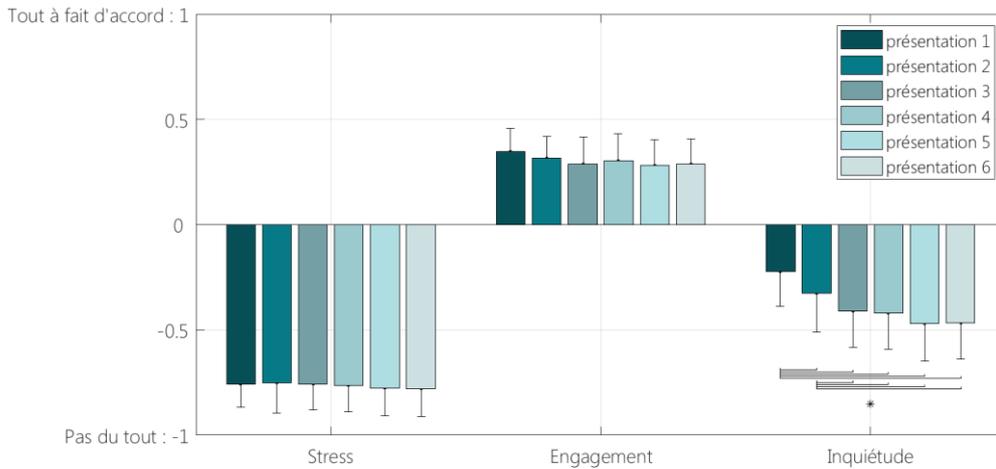


Figure 76 : Dimensions du SSSQ en fonction du temps durant la tâche de lecture.

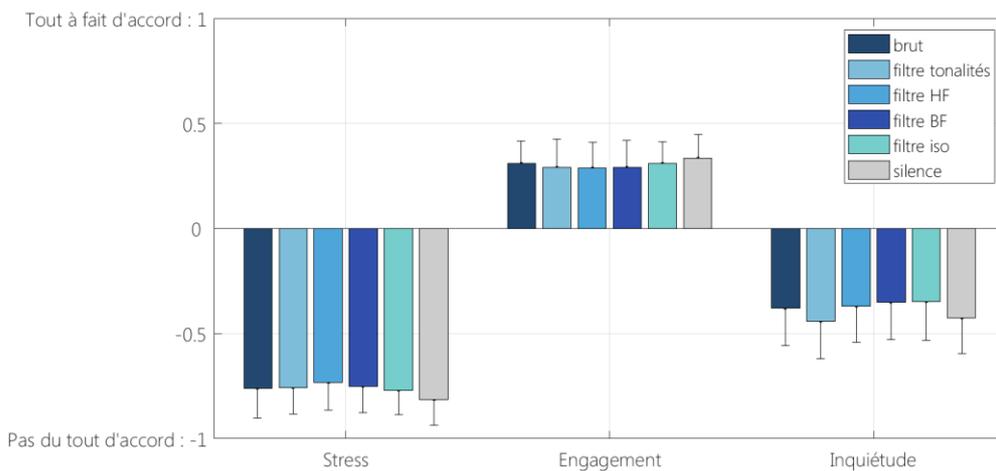


Figure 77 : Dimensions du SSSQ en fonction des conditions sonores durant la tâche de lecture.

Evaluation subjective des conditions sonores

L'analyse de l'évaluation subjective des conditions de bruit a montré un effet significatif des conditions sonores sur tous les termes, à l'exception de l'habituation, le Tableau 11 résume ces résultats. Les principaux résultats ont montré que la condition silencieuse a été significativement jugée plus basse sur tous les termes, à l'exception de l'habituation. De plus, le bruit brut a été jugé plus intense que le bruit filtré sur toutes les tonalités. Le bruit filtré a été jugé moins fort et moins fatigant que le bruit brut et le bruit isophonique. Le bruit filtré a également été perçu moins aigu que le bruit isophonique. Le bruit isophonique a été perçu plus fluctuant que le bruit filtré et le bruit filtré en hautes fréquences.

Tableau 11 : Résumé des résultats de l'évaluation subjective des conditions sonores sur la tâche de lecture avec la moyenne ± écart-type. Les * représentent un test de Wilcoxon significatif avec les conditions en exposant

	1 : Brut	2 : Filtre tonalités	3 : Filtre HF	4 : Filtre BF	5 : Isophonique	6 : Silence
Intensité	5.1 ± 1.5 * ²	4.3 ± 1.4 * ^{1,5}	4.9 ± 1.5	4.7 ± 1.4	4.8 ± 1.4 * ²	1.2 ± 0.7 * ^{1,2,3,4,5}
Grave	3.7 ± 1.6	4.3 ± 1.5	4.0 ± 1.5	4.2 ± 1.8	3.6 ± 1.6	1.2 ± 0.7 * ^{1,2,3,4,5}
Medium	4.5 ± 1.4	4.1 ± 1.3	4.5 ± 1.2	4.6 ± 1.4	4.3 ± 1.3	1.2 ± 0.7 * ^{1,2,3,4,5}
Aigu	4.2 ± 1.7	3.0 ± 1.4 * ⁵	4.0 ± 1.7	4.2 ± 1.7	4.3 ± 1.7 * ²	1.2 ± 0.7 * ^{1,2,3,4,5}
Tonal	3.5 ± 2.1	3.6 ± 7.9	4.3 ± 1.4	4.1 ± 2.0	3.9 ± 1.7	1.2 ± 0.7 * ^{1,2,3,4,5}
Fluctuation	3.2 ± 1.8	2.4 ± 1.0 * ⁵	2.9 ± 1.5 * ⁵	3.0 ± 1.7	3.4 ± 1.3 * ^{2,3}	1.6 ± 1.6 * ^{1,2,3,4,5}
Distraction	3.6 ± 1.8	3.1 ± 1.6	3.5 ± 1.7	3.1 ± 1.5	3.2 ± 1.7	1.5 ± 1.2 * ^{1,2,3,4,5}
Agacement	3.8 ± 1.9	3.3 ± 1.6	3.8 ± 2.1	3.6 ± 1.9	3.4 ± 1.8	1.3 ± 1.0 * ^{1,2,3,4,5}
Fatigant	3.7 ± 2.0	3.3 ± 1.9 * ⁵	3.8 ± 1.9	3.9 ± 1.9	3.7 ± 1.8 * ²	1.1 ± 0.5 * ^{1,2,3,4,5}
Habitué	4.6 ± 1.9	4.9 ± 1.7	4.6 ± 1.7	4.8 ± 1.5	4.7 ± 1.7	3.6 ± 2.9
Stressant	2.5 ± 1.6	2.4 ± 1.64	2.7 ± 1.6	2.6 ± 1.4 * ^{2,3}	2.4 ± 1.5	1.1 ± 0.4 * ^{1,2,3,4,5}

Comparaisons par paires des conditions bruyantes

Les comparaisons par paires avaient pour but de confronter les différents bruits d'hélicoptère afin d'identifier les plus dérangeants relativement aux autres. Les résultats montrent qu'il y a un effet significatif des conditions sonores [$\chi^2(4) = 65.90$, $p < 0.01$; Figure 78]. Chaque bruit est significativement différent des autres. Ainsi, le bruit brut a été celui le plus souvent choisi par les participants comme étant le bruit le plus dérangeant, suivi du filtre basses-fréquences, du filtre hautes-fréquences du filtre isophonique.

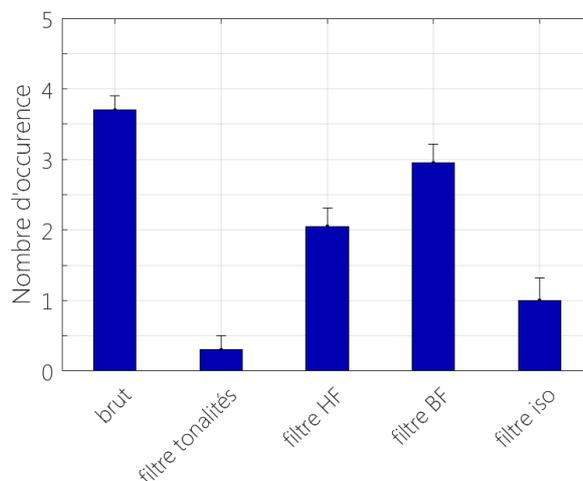


Figure 78 : Graphique représentant les résultats des comparaisons par paires ayant pour but de définir le bruit le plus dérangeant durant la tâche de lecture

3.2.2. Résultats comportementaux de la tâche de lecture

Les résultats comportementaux de la tâche de lecture sont le temps de lecture, le nombre de fixations, la longueur des saccades et le nombre de régressions pour chaque texte. Le temps de lecture a été analysé en fonction du temps, des conditions sonores ainsi qu'en fonction du texte lu. Les données oculométriques n'ont été analysées qu'en fonction des conditions sonores et concernent le nombre de fixations, la longueur des saccades et le nombre de régressions

Temps de lecture

L'analyse du temps de lecture en fonction du temps a montré un effet significatif [$F(5,95) = 8,66, p < 0.01, \eta_p^2 = 0.31$]. Le test Post-Hoc LSD a révélé que le temps de lecture était décroissant au fur et à mesure des passations, avec les premières passations plus longues que les dernières ($p < 0.05$; Figure 79).

L'analyse n'a pas révélé d'effet significatif de la condition sonore [$F(5,95) = 1.22, p = 0.30, \eta_p^2 = 0.06$; Figure 79].

En fonction des textes l'analyse a révélé un effet significatif [$F(5,90) = 5.14, p < 0.01, \eta_p^2 = 0.22$]. Le test Post-Hoc de LSD a montré que certains textes étaient lus plus rapidement que d'autres (texte 1, texte 4 et texte 6, $p < 0.05$) et d'autres plus lentement (texte 3 et texte 5, $p < 0.01$; Figure 79).

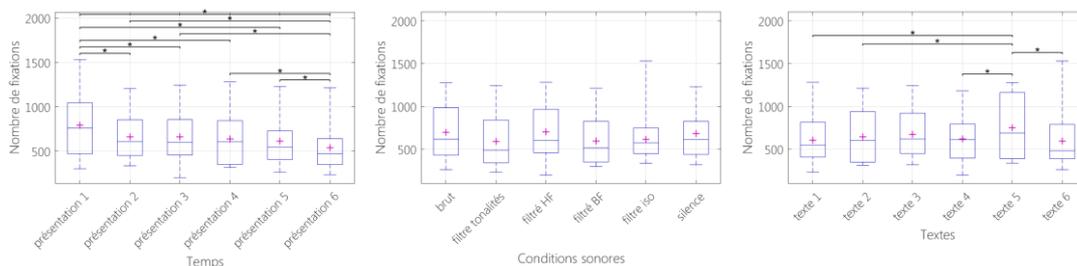


Figure 79: Temps de lecture des textes durant la tâche 2 de lecture en fonction du temps (à gauche), en fonction des conditions sonores (au milieu), en fonction des textes (à droite)

Métriques oculométriques

Les données oculométriques ont été analysées en termes de nombres de fixations, de durée des saccades et de nombre de régression.

Nombre de fixations

L'analyse du nombre de fixation a montré un effet significatif du temps [$\chi^2(5) = 20.88, p < 0.01$]. Les résultats des comparaisons deux à deux montrent que le

nombre de fixation a décroît en fonction du temps ($p < 0.05$; Figure 80). L'analyse du nombre de fixation n'a pas montré d'effet significatif des conditions sonores [$\chi^2(5) = 9.69, p = 0.08$]. Et finalement, l'analyse du nombre de fixations a révélé un effet significatif du texte [$\chi^2(5) = 13.00, p < 0.05$]. Les résultats des comparaisons deux à deux ont montré que le texte 5 présentait plus de fixations que la plupart des autres textes (Figure 80).

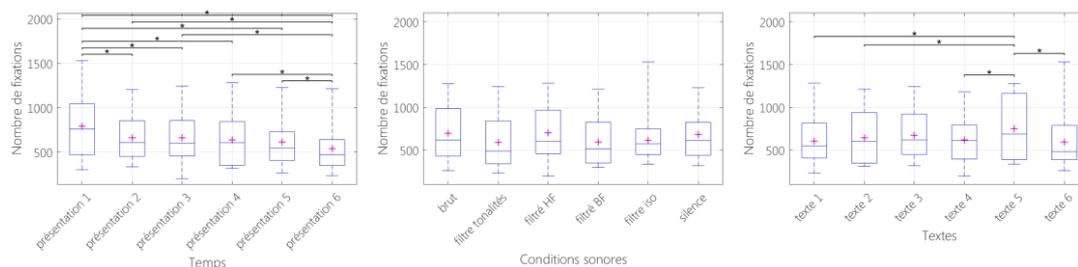


Figure 80 : Nombre de fixations en fonction du temps (à gauche), en fonction des conditions sonores (au milieu) et en fonction des textes (à droite)

Durée des saccades

L'analyse de la durée des saccades a montré un effet significatif du temps [$\chi^2(5) = 27.66, p < 0.01$]. Les résultats des comparaisons deux à deux montrent que la durée des saccades a décroît en fonction du temps ($p < 0.05$; Figure 81). L'analyse de la durée des saccades n'a pas montré d'effet significatif des conditions sonores [$\chi^2(5) = 6.73, p = 0.24$]. Et finalement, l'analyse de la durée des saccades a révélé un effet significatif du texte [$\chi^2(5) = 16.55, p < 0.01$]. Les résultats des comparaisons deux à deux ont montré que le texte 5 présentait plus de fixations que la plupart des autres textes (Figure 81).

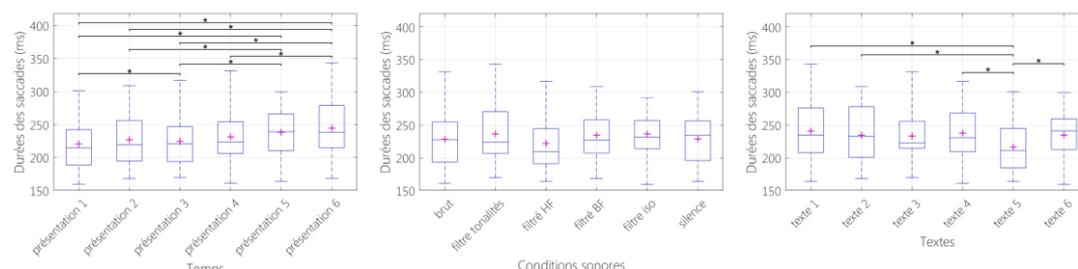


Figure 81 : Durée des saccades en millisecondes en fonction du temps (à gauche), en fonction des conditions sonores (au milieu) et en fonction des textes (à droite)

Nombre de régressions

L'analyse du nombre de régressions a montré un effet significatif du temps [$\chi^2(5) = 21.09, p < 0.01$]. Les résultats des comparaisons deux à deux montrent que

le nombre de régressions a décroît en fonction du temps ($p < 0.05$; Figure 82). L'analyse du nombre de régressions n'a pas montré d'effet significatif des conditions sonores [$\chi^2(5) = 3.83, p = 0.57$]. Et finalement, l'analyse du nombre de régressions a révélé un effet significatif du texte [$\chi^2(5) = 11.16, p < 0.05$]. Les résultats des comparaisons deux à deux ont montré que le texte 5 présentait plus de régressions que la plupart des autres textes (Figure 82).

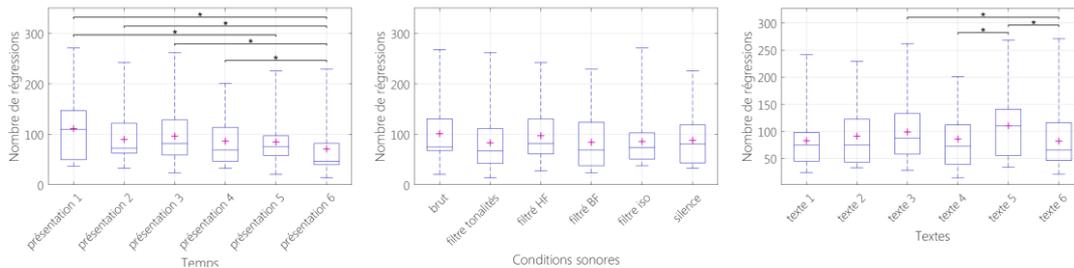


Figure 82 : Nombre de régressions en fonction du temps (à gauche), en fonction des conditions sonores (au milieu) et en fonction des textes (à droite)

3.2.3. Résultats psychophysologiques de la tâche de lecture

Les mesures psychophysologiques analysées durant cette étude étaient les bandes thêta, alpha et gamma de l'EEG, l'indice TLI EEG, le rythme cardiaque et sa variabilité. Les données des sujets 1 et 3 n'ayant pas pu être analysées en raison d'un problème d'enregistrement, les analyses physiologiques n'ont été réalisées que sur 18 sujets.

EEG

Thêta

L'analyse du rythme thêta sur les régions frontales n'a pas montré d'effet significatif du temps [$\chi^2(5) = 6.19, p = 0.29$]. De la même manière, l'analyse du rythme thêta n'a pas montré d'effet en fonction des conditions sonores [$\chi^2(5) = 9.97, p = 0.07$; Figure 83].

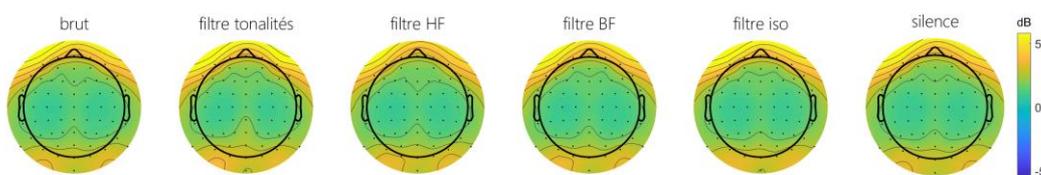


Figure 83 : Cartes topographiques de la puissance du rythme thêta en fonction des conditions sonores durant la tâche de lecture

Alpha

L'analyse du rythme alpha sur les régions pariéto-occipitales n'a pas montré d'effet significatif du temps [$\chi^2(5) = 10.06, p = 0.07$]. De la même manière, l'analyse du rythme alpha n'a pas montré d'effet significatif des conditions sonores [$\chi^2(5) = 4.63, p = 0.46$].

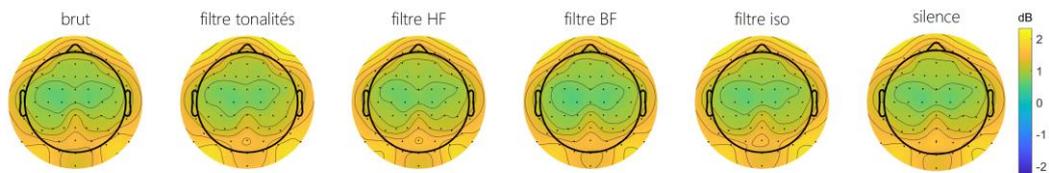


Figure 84 : Cartes topographiques de la puissance du rythme alpha en fonction des conditions sonores durant la tâche de lecture

Gamma

L'analyse du rythme gamma sur les régions frontales a montré un effet significatif du temps [$\chi^2(5) = 16.57, p < 0.01$; Figure 85]. Le test Post-Hoc LSD a révélé que la puissance du rythme gamma lors de la troisième passation était significativement plus basse que toutes les autres passations ($p < 0.05$).

Concernant l'analyse en fonction des conditions sonores, il y avait un effet significatif [$\chi^2(5) = 14.67, p < 0.05$; Figure 86]. Le test Post-Hoc LSD a révélé que la puissance du rythme gamma de condition silencieuse était significativement plus élevée que toutes les conditions à l'exception du bruit filtré en hautes-fréquences ($p < 0.05$).

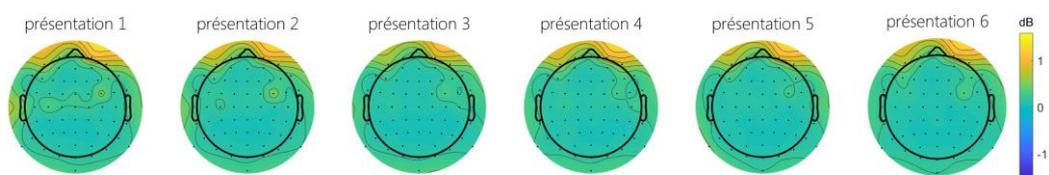


Figure 85 : Cartes topographiques de la puissance du rythme gamma en fonction du temps durant la tâche de lecture

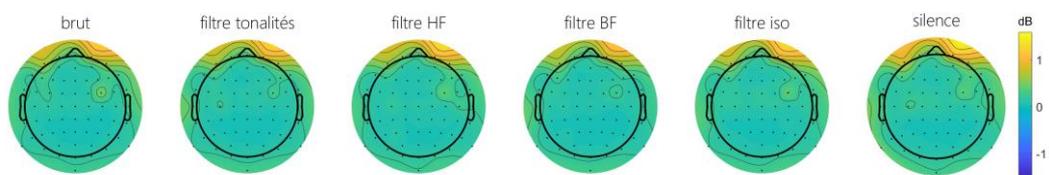


Figure 86 : Cartes topographiques de la puissance du rythme gamma en fonction des conditions sonores durant la tâche de lecture

TLI

L'analyse de la charge cognitive via le ratio TLI n'a par contre pas montré d'effet significatif du temps [$\chi^2(5) = 2.47, p = 0.78$], ni d'effet significatif des conditions sonores [$\chi^2(5) = 4.89, p = 0.43$].

ECG

Le rythme cardiaque ainsi que sa variabilité ont été analysés.

BPM

L'analyse du rythme (BPM) a montré un effet significatif du temps [$F(5,55) = 8.44, p < 0.01, \eta_p^2 = 0.43$; Figure 87], le rythme cardiaque a ralenti au court de l'expérience. L'analyse en fonction des conditions sonores n'a pas montré d'effet significatif [$F(5,55) = 1.34, p = 0.26, \eta_p^2 = 0.10$; Figure 90]. Cependant, on peut souligner le fait que la moyenne du rythme sur toutes les conditions bruyantes ($M = 68.90 \pm 7.88$) était significativement plus élevée qu'en condition silencieuse ($M = 67.37 \pm 8.58$) [$t(15) = 32.67, p < 0.01$; Figure 88].

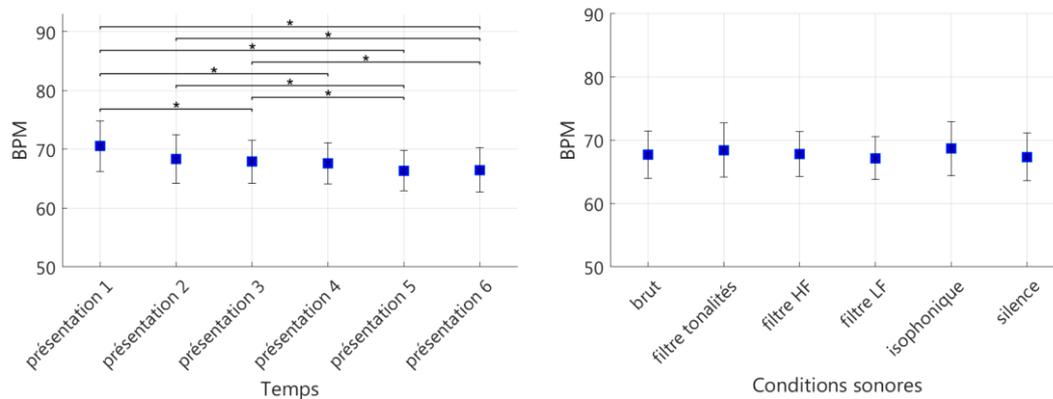


Figure 87 : Battements par minutes durant la tâche de lecture en fonction du temps (à gauche) et en fonction des conditions sonores (à droite)

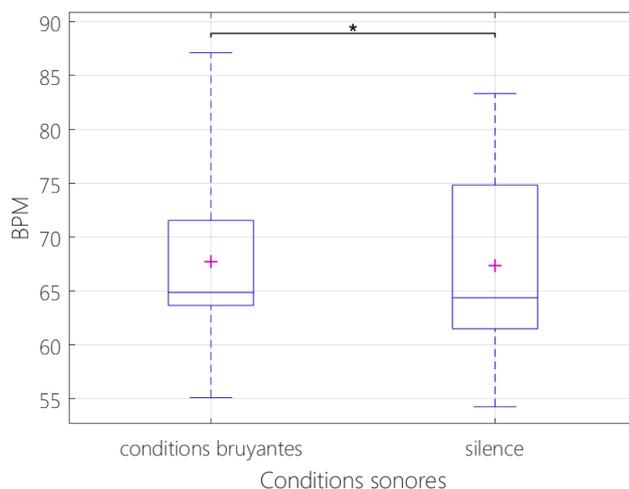


Figure 88 : Rythme cardiaque moyenné sur l'ensemble des conditions bruyantes vs le silence durant la tâche de lecture

NN50

L'analyse de la HRV via l'indice NN50 montre un effet significatif du temps [$F(5,55) = 6.86, p < 0.01, \eta_p^2 = 0.38$; Figure 89], augmentant en fonction de celui-ci. Nous n'avons toutefois pas trouvé d'effet significatif des conditions sonores [$F(5,55) = 1.45, p = 0.22, \eta_p^2 = 0.12$; Figure 89].

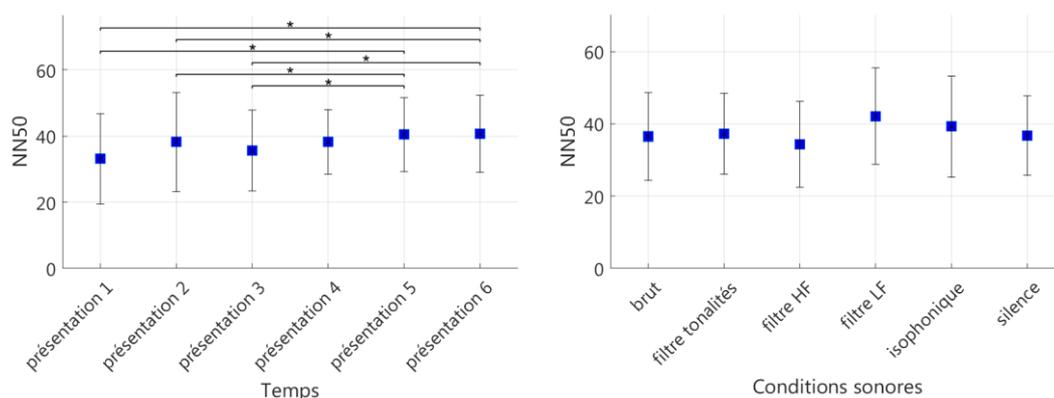


Figure 89 : Indice du NN50 durant la tâche de lecture en fonction du temps (à gauche) et en fonction des conditions sonores (à droite)

3.2.4. Résultats des corrélations de la tâche de lecture

Le Tableau 12 présente les statistiques descriptives de la personnalité des participants. Les résultats des corrélations n'ont pas montré de résultats

particulièrement significatifs. Les Tableau 20 et Tableau 21 (Annexe 4, p.228) résumement ces résultats.

Tableau 12 : Statistiques descriptives de la personnalité du groupe de participants ayant réalisé la tâche 2 de lecture

	Sensibilité au bruit	Neuroticisme	Extraversion
Moyenne	17.0	2.0	4.3
Ecart-type	6.2	1.7	1.9
Médiane	17.0	1.0	5.0

3.2.5. Résumé des résultats de la tâche de lecture

Les principaux résultats de cette étude montrent qu'il y a un effet du temps sur certaines métriques analysées. Concernant les résultats subjectifs, la fatigue a été jugée plus importante au court de l'expérience tandis que l'inquiétude a diminuée. Un effet du temps a également été retrouvé sur les données ECG, se traduisant par une baisse de la charge cognitive au court du temps.

Concernant les conditions sonores, la lecture a été jugée plus facile durant la condition silencieuse malgré que les temps de lecture et les données oculométriques n'aient pas révélé de difficulté particulière durant la tâche de lecture en conditions bruyantes. Cet effet du bruit vs silence était également retrouvé sur le rythme cardiaque qui était plus important durant les conditions bruyantes (toutes les conditions avec un bruit moyennées) comparé au silence. Finalement, le bruit brut a aussi été perçu comme le plus dérangeant dans cette expérience.

Finalement, les résultats des analyses en fonction des textes ont suggéré que le texte 5 présentait une difficulté de lecture plus importante par rapport aux autres textes avec un temps de lecture plus important et des données oculométriques plus dégradées.

3.3. TACHE 3 DE REPOS

La tâche de repos consistait à se détendre tout en visualisant une vidéo présentant des nuages qui défilent. Durant cette tâche, aucune donnée comportementale n'a été analysée, étant donné que les participants devaient simplement se reposer.

3.3.1. Résultats subjectifs de la tâche de repos

Les résultats subjectifs analysés dans cette étude étaient le niveau de fatigue ressentie, le niveau de stress évalué grâce au SSSQ, la perception subjective des conditions sonores et la comparaison par paires des bruits.

Niveau de fatigue ressentie

L'analyse de la difficulté subjective a montré qu'il n'y avait pas d'effet significatif du temps [$F(5,80) = 1.93, p = 0.10, \eta_p^2 = 0.10$; Figure 90]. Le son brut était en moyenne jugé le plus fatigant mais nous n'avons pas retrouvé d'effet principal significatif des conditions sonores [$F(5,80) = 1.62, p = 0.39, \eta_p^2 = 0.06$; Figure 91]. Ainsi, la fatigue a été perçue de manière équivalente au cours de l'expérience, quelle que soit la condition sonore présentée. Ce résultat conforte encore l'idée que ce sont bien les répétitions des tâches et non des expositions aux bruits qui augmentent le niveau de fatigue.

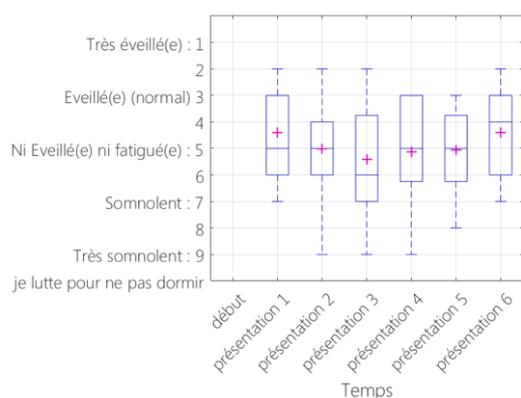


Figure 90 : Niveau de fatigue subjective lors de la tâche de repos en fonction du temps

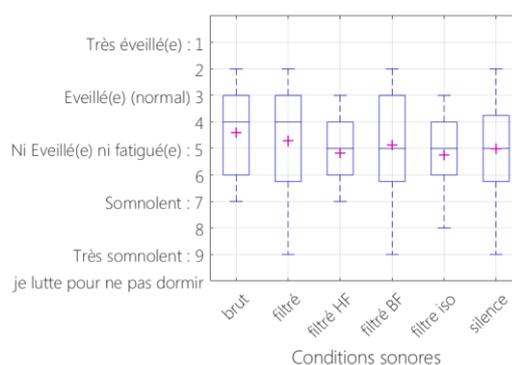


Figure 91 : Niveau de fatigue subjective lors de la tâche de repos en fonction des conditions sonores

Résultats du SSSQ

L'analyse des trois dimensions du SSSQ en fonction du temps a révélé un effet principal significatif des dimensions [$F(1,32) = 36.94, p < 0.01, \eta_p^2 = 0.69$]. Le test Post-Hoc LSD a montré que la dimension de l'engagement était plus élevée que le niveau de stress et l'inquiétude. L'analyse n'a pas révélé d'effet principal du temps [$F(5,80) = 1.75, p = 0.13, \eta_p^2 = 0.10$]. L'interaction entre le temps et les trois dimensions du SSSQ n'a, en revanche, pas révélé d'effet significatif comme c'était le cas dans la tâche 1 et 2 mais une tendance [$F(10,160) = 1.81, p = 0.06, \eta_p^2 = 0.10$].

L'analyse des trois dimensions du SSSQ en fonction des conditions sonores a révélé un effet principal significatif des sons [$F(5,80) = 2.87, p < 0.05, \eta_p^2 = 0.15$]. Le test Post-Hoc LSD a révélé que le bruit brut et le bruit filtré en basses fréquences

possédaient des indices du SSSQ plus élevés que les autres conditions ($p < 0.05$). L'interaction des trois dimensions avec les conditions sonores n'a pas présenté d'effet significatif mais une tendance [$F(10,160) = 1.85, p = 0.06, \eta_p^2 = 0.10$], pouvant révéler que le bruit brut et le bruit filtré en basses-fréquences seraient plus stressants.

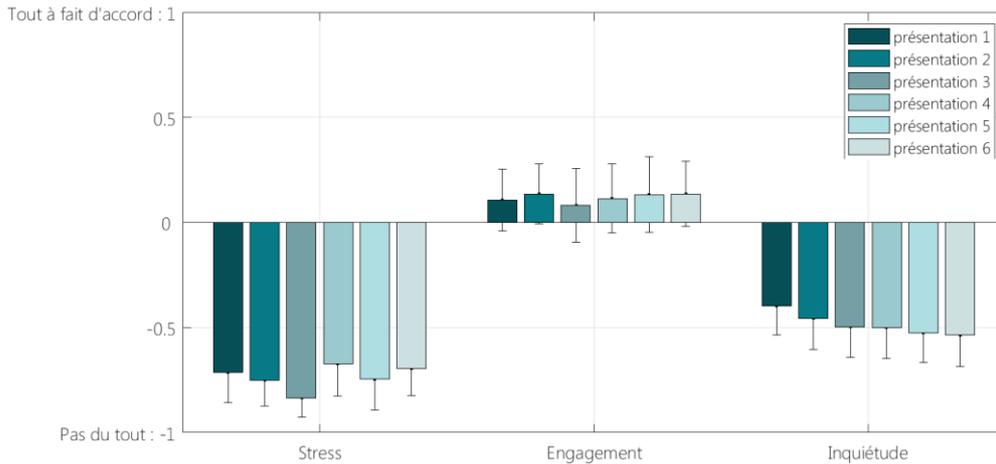


Figure 92 : Dimensions du SSSQ en fonction du temps durant la tâche de repos.

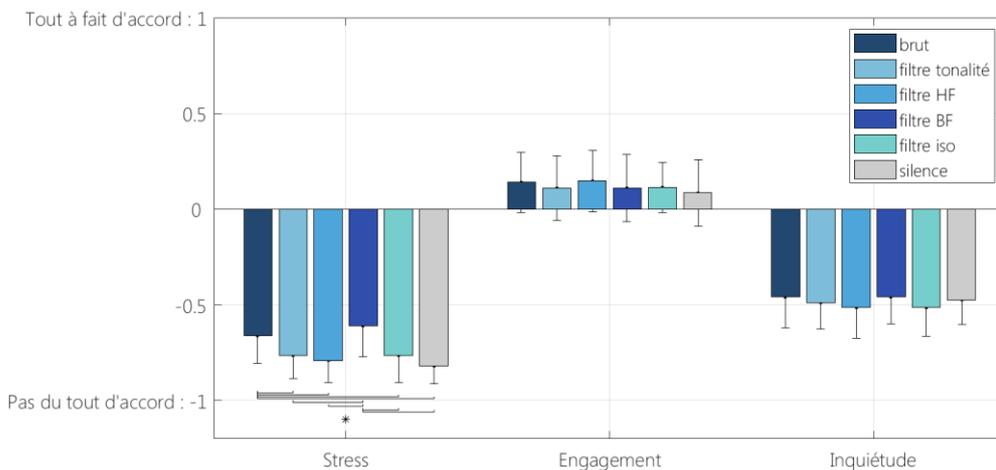


Figure 93 : Dimensions du SSSQ en fonction des conditions sonores durant la tâche de repos.

Evaluation subjective des conditions sonores

L'analyse de l'évaluation subjective des conditions sonores a montré un effet significatif des conditions sonores sur tous les termes. Le Tableau 13 résume ces résultats. Les principaux résultats ont montré que la condition silencieuse a été significativement jugée plus basse.

Le bruit filtré en hautes fréquences a été jugé moins intense que le bruit filtré en basses fréquences. Le bruit filtré sur toutes les tonalités a été jugé plus grave que les autres bruits à l'exception du bruit isophonique. Les bruits bruts et filtré en basses-fréquences ont été perçus plus aigus que les autres bruits. Le bruit filtré en basses fréquences a été jugé plus fluctuant que le bruit filtré en hautes fréquences et le bruit isophonique. Le bruit filtré en basses-fréquences a été perçu comme plus distrayant que le bruit filtré, le bruit filtré en hautes-fréquences et le bruit filtré isophoniquement. De même le bruit brut et le bruit filtré en basses-fréquences seraient perçus plus fatigants et plus stressants.

*Tableau 13 : Résumé des résultats de l'évaluation subjective des conditions sonores sur la tâche de repos avec la moyenne ± écart-type. La condition 2 représente le bruit filtré sur toutes les tonalités. HF = hautes-fréquences, BF = basses-fréquences. Les * représentent un test de Wilcoxon significatif avec les conditions en exposant.*

	1 : Brut	2 : Filtre tonalités	3 : Filtre HF	4 : Filtre BF	5 : Isophonique	6 : Silence
Intensité	4.8 ± 1.4	4.5 ± 1.2	4.1 ± 1.5 * ⁴	4.9 ± 1.5 * ³	4.2 ± 1.1	1.0 ± 0.0 * ^{1,2,3,4,5}
Grave	3.5 ± 1.9 * ²	5.1 ± 1.2 * ^{1,3,4}	4.0 ± 1.5 * ²	3.9 ± 1.6 * ²	4.2 ± 1.4	1.0 ± 0.0 * ^{1,2,3,4,5}
Medium	4.4 ± 1.5	4.1 ± 1.4	3.7 ± 1.3	3.9 ± 1.5	4.3 ± 1.2	1.0 ± 0.0 * ^{1,2,3,4,5}
Aigu	5.4 ± 1.3 * ^{2,3}	4.4 ± 1.5 * ^{1,4}	4.5 ± 1.4 * ^{1,4}	5.6 ± 1.2 * ^{2,3,5}	4.3 ± 1.6 * ⁵	1.0 ± 0.0 * ^{1,2,3,4,5}
Tonal	1.5 ± 1.6	3.7 ± 1.9 * ³	5.2 ± 1.3 * ²	4.6 ± 2.0	4.4 ± 1.9	1.0 ± 0.0 * ^{1,2,3,4,5}
Fluctuation	3.6 ± 1.4 * ⁵	3.5 ± 1.7	2.9 ± 1.6 * ⁴	4.1 ± 1.2 * ^{3,5}	2.7 ± 1.4 * ^{1,4}	1.0 ± 0.0 * ^{1,2,3,4,5}
Distraktion	3.1 ± 1.7	2.6 ± 1.4 * ⁴	2.6 ± 1.7 * ⁴	3.6 ± 1.8 * ^{2,3,5}	2.7 ± 1.4 * ⁴	1.2 ± 0.8 * ^{1,2,3,4,5}
Agacement	3.8 ± 2.3	3.4 ± 2.0	3.4 ± 2.1	4.1 ± 2.1	3.6 ± 2.1	1.4 ± 0.9 * ^{1,2,3,4,5}
Fatigant	4.4 ± 1.8 * ²	3.4 ± 1.5 * ^{1,4}	3.6 ± 2.1	4.2 ± 1.9 * ²	3.4 ± 1.7	1.2 ± 0.8 * ^{1,2,3,4,5}
Habituation	4.2 ± 1.8	4.9 ± 1.6	4.6 ± 1.8	4.5 ± 1.7	4.8 ± 1.3	2.6 ± 2.5 * ^{1,2,3,4,5}
Stressant	3.2 ± 1.9	2.5 ± 1.6 * ⁴	2.8 ± 1.8	3.4 ± 2.0 * ²	2.6 ± 1.6	1.1 ± 0.2 * ^{1,2,3,4,5}

Comparaisons par paires des conditions bruyantes

Les comparaisons par paires avaient pour but de confronter les différents bruits d'hélicoptère afin d'identifier les plus dérangeants relativement aux autres. Les résultats montrent qu'il y a un effet significatif des conditions sonores [$\chi^2(4) = 57.63$, $p < 0.01$]. Le bruit brut et le bruit filtré en basses fréquences ont été considérés comme les plus dérangeants de manière équivalente, suivi du bruit filtré en hautes fréquences. Le bruit filtré et le bruit isophonique ont été perçus aussi dérangeant l'un que l'autre.

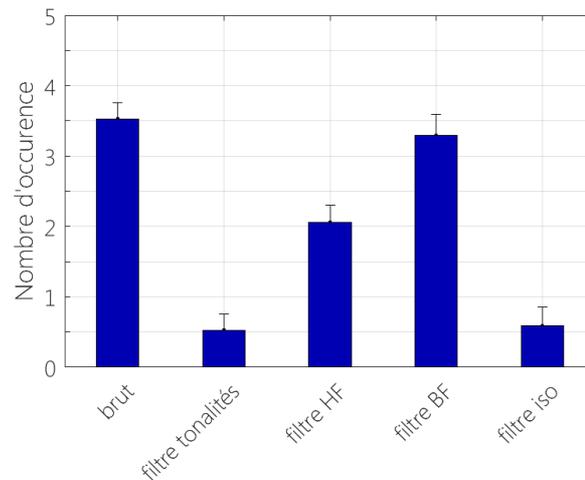


Figure 94 : Graphique représentant les résultats des comparaisons par paires ayant pour but de définir le bruit le plus dérangement durant la tâche de repos

3.3.2. Résultats psychophysiques de la tâche de repos

Les mesures psychophysiques analysées durant cette étude étaient les bandes thêta, alpha et gamma de l'EEG, l'indice TLI EEG, le rythme cardiaque et sa variabilité. Les données du sujet 10 n'ayant pas pu être analysées en raison d'un problème d'enregistrement, les analyses psychophysiques n'ont été réalisées que sur 16 sujets.

EEG

Thêta

L'analyse du rythme thêta sur les régions frontales n'a pas montré d'effet significatif du temps [$\chi^2(5) = 5.18, p = 0.39$]. De la même manière, l'analyse du rythme thêta n'a pas montré d'effet en fonction des conditions sonores [$\chi^2(5) = 2.04, p = 0.84$; Figure 95].

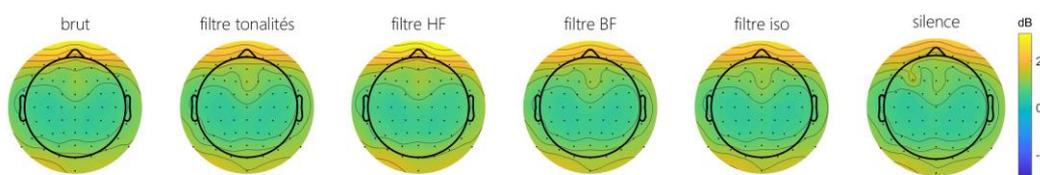


Figure 95 : Cartes topographiques de la puissance du rythme thêta durant la tâche de repos en fonction des conditions sonores

Alpha

L'analyse du rythme alpha sur les régions pariéto-occipitales a montré un effet significatif du temps [$\chi^2(5) = 15,25, p < 0.01$]. La puissance du rythme alpha durant la première passation a été significativement plus basse que toutes les autres conditions, à l'exception de la troisième passation ($p < 0.05$; Figure 96). La puissance du rythme alpha a été significativement plus haute durant les deux dernières passations, comparées aux deux premières. On peut donc en conclure que la puissance du rythme alpha a augmenté en fonction de la durée d'exposition de la tâche. L'analyse du rythme alpha n'a toutefois pas montré d'effet significatif des conditions sonores [$\chi^2(5) = 5.96, p = 0.31$; Figure 97].

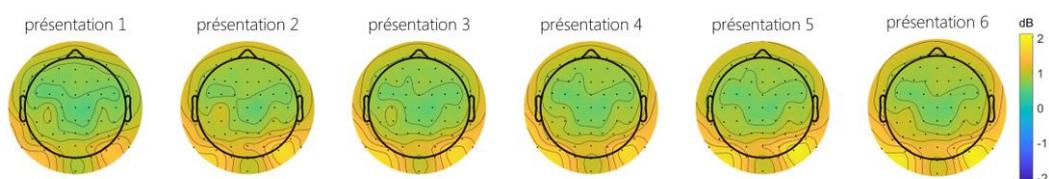


Figure 96 : Cartes topographiques de la puissance du rythme alpha sur la région pariéto-occipitale en fonction du temps durant la tâche de repos

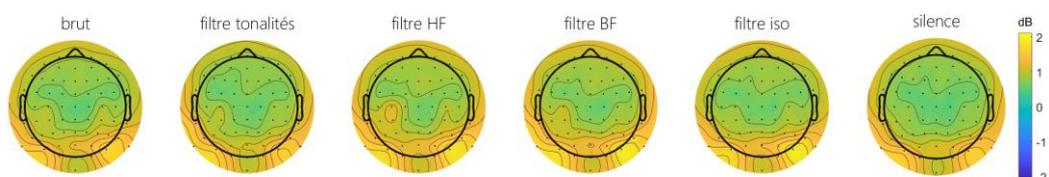


Figure 97 : Cartes topographiques de la puissance du rythme alpha en fonction des conditions sonores durant la tâche de repos

Gamma

L'analyse du rythme gamma sur les régions frontales n'a pas montré d'effet significatif du temps [$\chi^2(5) = 4.36, p = 0.50$]. De la même manière, l'analyse en fonction des conditions sonores, n'a pas montré d'effet significatif [$\chi^2(5) = 1.93, p = 0.86$; Figure 98].

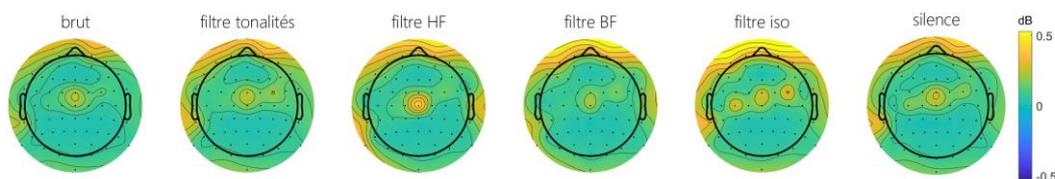


Figure 98 : Cartes topographiques de la puissance du rythme gamma durant la tâche de repos en fonction des conditions sonores

TLI

L'analyse de la charge cognitive via le ratio TLI n'a pas montré d'effet significatif du temps [$\chi^2(5) = 2.75, p = 0.74$], ni d'effet significatif des conditions sonores [$\chi^2(5) = 6.86, p = 0.23$].

ECG

Le rythme cardiaque ainsi que sa variabilité ont été analysés.

BPM

L'analyse du rythme (BPM) n'a pas montré d'effet significatif du temps [$F(5,55) = 0.85, p = 0.52, \eta_p^2 = 0.07$; Figure 99]. L'analyse en fonction des conditions sonores n'a pas montré d'effet significatif mais une tendance [$F(5,55) = 2.18, p = 0.07, \eta_p^2 = 0.17$; Figure 99]. La moyenne du rythme cardiaque de la condition silencieuse ($M = 72.09 \pm 8.87$) significativement étant moins élevée que la moyenne des autres conditions avec du bruit ($M = 74.14 \pm 9.52$) [$t(15) = 29.07, p < 0.01$; Figure 100]. Ce résultat suggère que durant la tâche silencieuse, les participants auraient eu un rythme cardiaque plus bas.

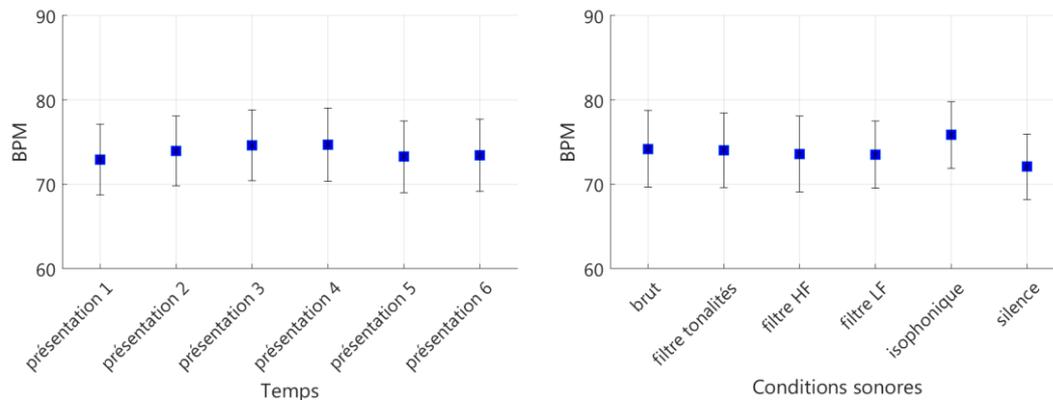


Figure 99 : Battements par minutes durant la tâche de repos en fonction du temps (à gauche) et en fonction des conditions sonores (à droite)

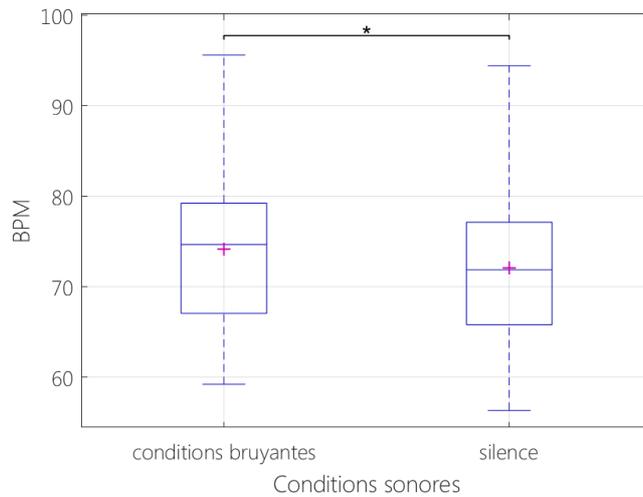


Figure 100 : Rythme cardiaque moyenné sur l'ensemble des conditions bruyantes vs le silence durant la tâche de repos

NN50

L'analyse de la HRV via l'indice NN50 montre un effet significatif du temps [$F(5,55) = 2.55, p < 0.05, \eta_p^2 = 0.19$; Figure 101], augmentant en fonction de celui-ci. Ce résultat suggère que la variabilité du rythme cardiaque était de plus en plus grande au court de l'expérience. Nous n'avons pas trouvé d'effet significatif des conditions sonores [$F(5,55) = 0.57, p = 0.72, \eta_p^2 = 0.05$; Figure 101].

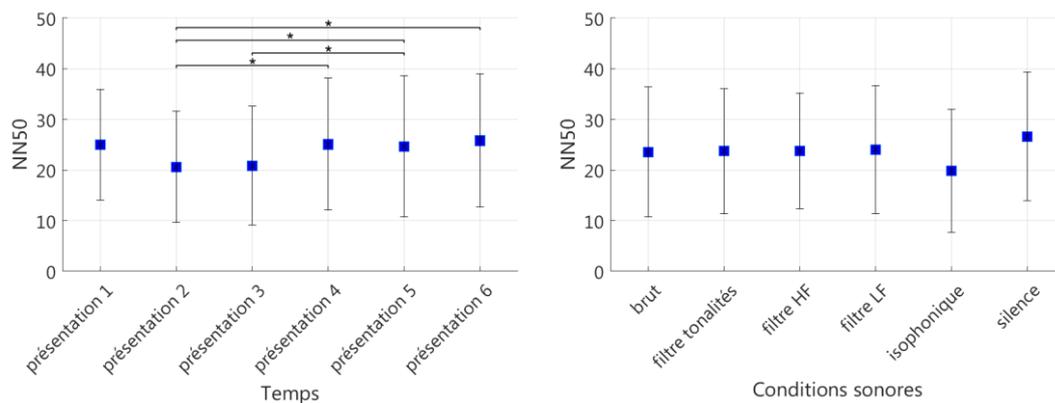


Figure 101 : Indice du NN50 durant la tâche de repos en fonction du temps (à gauche) et en fonction des conditions sonores (à droite)

3.3.3. Résultats des corrélations de la tâche de repos

Le tableau suivant (Tableau 14) présente les statistiques descriptives de la personnalité des participants. Les corrélations ont été réalisées uniquement sur les

mesures subjectives pour cette étude étant donné qu'il n'y avait pas de résultats comportementaux, le Tableau 22 (Annexe 5, p.232) résume ces résultats.

Tableau 14 : Statistiques descriptives de la personnalité du groupe de participants ayant réalisés la tâche 3 de repos

	Sensibilité au bruit	Neuroticisme	Extraversion
Moyenne	19.5	2.4	3.4
Ecart-type	6.2	1.4	2.4
Médiane	20.0	3.0	5.0

3.3.4. Résumé des résultats de la tâche de repos

Malgré que la fatigue ressentie n'ait pas été plus importante au fil du temps, les résultats psychophysiologiques montrent une fatigue mentale plus importante au cours de l'expérience se traduisant par une augmentation de la puissance de la bande alpha et une augmentation de la HRV.

Les participants ont distingué davantage de différence lors de l'évaluation de la perception subjective des bruits. De plus, les résultats du SSSQ ont montré que l'état de stress a été plus important durant l'exposition au bruit brut et au bruit filtré en basses-fréquences, qui étaient d'ailleurs considérés comme les plus dérangeants. De plus, le rythme cardiaque durant les conditions bruyantes (toutes les conditions avec un bruit moyennées) était supérieur lorsqu'il était comparé au silence.

3.4. RESULTATS COMBINES DES TROIS TACHES

Pour pouvoir distinguer si les résultats dépendaient de la tâche réalisée par les participants, nous avons combinés tous les résultats pour pouvoir comparer l'effet du groupe (tâche). Ainsi, les résultats subjectifs de la TNT, de la tâche de lecture et de la tâche de repos ont été combinés. Nous nous sommes focalisés sur les données subjectives, ainsi les données psychophysiologiques (EEG et ECG) n'ont pas été combinées pour être analysées. En effet, les comparaisons de ces métriques ne nous ont pas semblé pertinentes étant donné les exigences cognitives très différentes des tâches.

Nous avons utilisé une ANOVA classique pour cette analyse. En effet, malgré quelques rares variables qui ne respectaient pas les prérequis de l'ANOVA (non

homogénéité des variances et distribution non normale), le grand nombre de participants ($n = 57$) a permis de réaliser une analyse paramétrique robuste.

3.4.1. Résultats subjectifs combinés des trois tâches

Dans cette partie, les résultats de la fatigue ressentie, des dimensions du SSSQ, de l'évaluation subjective des conditions sonores et des comparaisons par paires des bruits ont été analysées. Le niveau de difficulté n'a pas été analysé dans la mesure où il n'était pas demandé dans la tâche de repos.

Fatigue ressentie

La fatigue au début de la tâche de repos n'ayant pas été enregistrée (sept mesures étaient prises pour les deux autres tâches : une au début de l'expérience puis une après chacune des six conditions sonores), seules six mesures ont pu être évaluées dans cette analyse globale portant sur les trois tâches.

L'analyse de la fatigue subjective en fonction du temps n'a pas révélé d'effet principal de la tâche [$F(2,54) = 2.43, p = 0.10, \eta_p^2 = 0.08$]. La fatigue a été perçue de manière équivalente quelle que soit la tâche réalisée par les participants. L'analyse a révélé un effet principal significatif du temps [$F(5,270) = 5.68, p < 0.01, \eta_p^2 = 0.10$]. L'analyse du test Post-Hoc LSD a montré que les conditions suivant les deux premières étaient perçues plus fatigantes. L'interaction entre les tâches et le temps a révélé une tendance [$F(10,270) = 1.75, p = 0.07, \eta_p^2 = 0.06$]. Il est intéressant de noter que le niveau de fatigue de base entre les trois groupes expérimentaux différait quelque peu, même si l'effet principal de la tâche (recoupant la notion de groupe puisque les tâches étaient réalisées par des groupes différents) n'atteignait pas le seuil de significativité. Ainsi, le niveau de fatigue entre la première et dernière passation des conditions évoluait de +0 pour le repos, alors qu'il augmentait de +0.94 pour la TNT et de +0.65 pour la lecture.

Concernant l'impact des conditions sonores sur la fatigue subjective, l'analyse n'a pas révélé d'effet principal de la tâche [$F(2,54) = 2.43, p = 0.10, \eta_p^2 = 0.08$], ni des conditions sonores [$F(5,270) = 0.99, p = 0.42, \eta_p^2 = 0.02$]. L'interaction n'a également pas révélé d'effet significatif [$F(10,270) = 0.82, p = 0.61, \eta_p^2 = 0.03$].

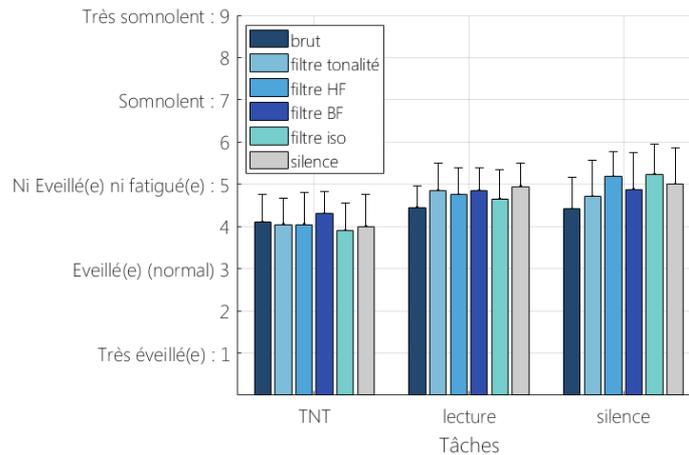


Figure 102: Fatigue ressentie durant les trois premières expériences (TNT, lecture et repos)

SSSQ

L'analyse des trois dimensions du SSSQ en fonction des conditions sonores n'a pas révélé d'effet significatif de la tâche [$F(2,54) = 0.99, p = 0.38, \eta_p^2 = 0.04$]. Un effet principal significatif des dimensions du SSSQ était présent [$F(2,108) = 219.00, p < 0.01, \eta_p^2 = 0.80$]. Le test Post-Hoc LSD a montré que la dimension de l'engagement dans la tâche avait un indice plus élevé que les deux autres dimensions du SSSQ. L'interaction entre les dimensions du SSSQ et la tâche a montré un effet significatif [$F(4,108) = 3.40, p < 0.05, \eta_p^2 = 0.11$]. Le test Post-Hoc LSD a révélé que le stress n'était pas différent en fonction de la tâche mais que l'engagement dans la tâche TNT était plus fort que celui dans la tâche de repos. La dimension de l'inquiétude était plus grande durant la TNT, suivi de la tâche lecture, puis de la tâche de repos. L'effet principal du temps a révélé un effet principal du temps [$F(5,270) = 18.42, p < 0.01, \eta_p^2 = 0.25$]. Le test Post-Hoc LSD a révélé que les deux premières passations avaient des indices SSSQ globalement significativement plus hauts que les quatre dernières, qui sembleraient se stabiliser. L'interaction entre le temps et la tâche a révélé un effet significatif [$F(10,270) = 3.67, p < 0.01, \eta_p^2 = 0.12$]. Le test Post-Hoc a montré que les dimensions ont globalement diminué durant l'expérience pour la tâche TNT et la tâche la lecture. L'interaction entre les dimensions du SSSQ et le temps a montré un effet significatif [$F(20,540) = 8.18, p < 0.01, \eta_p^2 = 0.13$]. Le test Post-Hoc de LSD a montré que la dimension de l'inquiétude était la seule qui diminuait dans le temps ($p < 0.05$). Finalement la triple interaction entre les dimensions du SSSQ, la tâche et le temps n'a montré d'effet significatif [$F(20,540) = 1.27, p = 0.19, \eta_p^2 = 0.04$].

L'effet principal des conditions sonores a révélé un effet significatif [$F(5,270) = 3.35, p < 0.01, \eta_p^2 = 0.06$]. Le test Post-Hoc LSD a révélé que les dimensions globales du SSSQ étaient plus grandes pour le bruit brut comparé au silence, ainsi

que pour le bruit filtré en basses-fréquences comparé au bruit filtré sur toutes les tonalités. Cependant, l'interaction entre les conditions sonores et la tâche n'a pas révélé d'effet significatif [$F(10,270) = 0.68, p = 0.75, \eta_p^2 = 0.02$]. L'interaction entre les trois dimensions du SSSQ et les conditions sonores a montré un effet significatif [$F(10,540) = 2.07, p < 0.05, \eta_p^2 = 0.04$], montrant que la dimension de l'engagement dans la tâche possédait un indice plus élevé que les autres dimensions. Finalement, l'interaction entre les dimensions du SSSQ, les conditions sonores et la tâche n'a pas révélé d'effet significatif [$F(1,20) = 1.14, p = 0.31, \eta_p^2 = 0.04$].

Evaluation subjective des conditions sonores

L'analyse de l'évaluation subjective des conditions de bruit a montré un effet significatif des conditions sonores sur tous les termes. Le Tableau 15 résume ces résultats. Concernant l'intensité, le bruit brut et le bruit filtré en basses-fréquences ont été significativement jugés plus intenses que le bruit filtré sur toutes les tonalités et le bruit filtré en hautes-fréquences. Le bruit brut a été perçu moins grave que le bruit filtré sur toutes les tonalités. Le bruit filtré sur toutes les tonalités a été perçu moins aigu que tous les autres bruits. Les bruits brut et filtré en basses-fréquences ont été ceux perçu avec le plus de composantes aigües. Le bruit filtré en hautes-fréquences a été perçu plus tonal que le bruit brut, le bruit filtré sur toutes les tonalités et le bruit filtré isophoniquement. Le bruit filtré sur toutes les tonalités a été jugé plus fluctuant que le bruit filtré en basses-fréquences et le bruit filtré isophoniquement. Le bruit brut a été perçu plus agaçant et fatigant généralement. Et le bruit filtré en basses-fréquences a été perçue plus stressant au cours du temps.

*Tableau 15 : Résumé des résultats de l'évaluation subjective des conditions sonores sur les trois tâches combinées avec la moyenne ± écart-type. Les * représentent un test de Wilcoxon significatif avec les conditions en exposant*

	1 : Brut	2 : Filtré tonalités	3 : Filtre HF	4 : Filtre BF	5 : Isophonique	6 : Silence
Intensité	5.0 ± 1.3 * ^{2,3}	4.6 ± 1.3 * ^{1,4}	4.6 ± 1.4 * ^{1,4}	5.1 ± 1.3 * ^{2,3}	4.8 ± 1.2	1.1 ± 0.4 * ^{1,2,3,4,5}
Grave	3.7 ± 1.6 * ²	4.5 ± 1.4 * ¹	4.1 ± 1.4	4.1 ± 1.6	4.2 ± 1.6	1.1 ± 0.4 * ^{1,2,3,4,5}
Medium	4.5 ± 1.2	4.4 ± 1.3	4.3 ± 1.3	4.5 ± 1.5	4.3 ± 1.3	1.1 ± 0.3 * ^{1,2,3,4,5}
Aigu	4.6 ± 1.6 * ^{2,3}	3.6 ± 1.6 * ^{1,3,4,5}	4.4 ± 1.6 * ^{1,2,4}	4.6 ± 1.7 * ^{2,3}	4.2 ± 1.8 * ²	1.1 ± 0.4 * ^{1,2,3,4,5}
Tonal	3.9 ± 2.0 * ³	3.6 ± 1.9 * ^{3,4}	4.5 ± 1.6 * ^{1,2,5}	4.2 ± 1.9 * ²	3.8 ± 1.9 * ³	1.1 ± 0.4 * ^{1,2,3,4,5}
Fluctuation	3.2 ± 1.5	2.8 ± 1.7 * ^{4,5}	3.0 ± 1.6	3.3 ± 1.5 * ²	3.3 ± 1.6 * ²	1.3 ± 1.0 * ^{1,2,3,4,5}
Distraction	3.4 ± 1.6	3.0 ± 1.5	3.0 ± 1.6	3.2 ± 1.6	3.0 ± 1.5	1.2 ± 0.8 * ^{1,2,3,4,5}
Agacement	3.9 ± 1.9 * ^{2,3,5}	3.3 ± 1.7 * ¹	3.5 ± 2.0 * ¹	3.7 ± 1.9	3.5 ± 1.8 * ¹	1.2 ± 0.7 * ^{1,2,3,4,5}
Fatigant	4.1 ± 1.8 * ^{2,3,5}	3.4 ± 1.7 * ^{1,4}	3.5 ± 2.0 * ¹	3.8 ± 1.9 * ²	3.5 ± 1.7 * ¹	1.1 ± 0.5 * ^{1,2,3,4,5}
Habituation	4.4 ± 1.7	4.8 ± 1.7	4.7 ± 1.6	4.6 ± 1.6	4.6 ± 1.5	2.7 ± 2.6 * ^{1,2,3,4,5}
Stressant	2.7 ± 1.6	2.4 ± 1.5 * ⁴	2.6 ± 1.6 * ⁴	3.0 ± 1.7 * ^{2,3,5}	2.5 ± 1.6 * ⁴	1.1 ± 0.3 * ^{1,2,3,4,5}

Comparaisons par paires des conditions bruyantes

L'analyse des comparaisons pas paires a montré un effet principal significatif des conditions sonores [$F(4,216) = 221.97, p < 0.01, \eta_p^2 = 0.80$]. Les tests post-hoc de LSD montrent que toutes les conditions étaient significativement différentes les unes des autres ($p < 0.05$). Cependant, l'interaction ne montre pas d'effet entre les conditions sonores et la tâche [$F(1,8) = 1.18, p = 0.31, \eta_p^2 = 0.04$]. Les résultats combinés vont dans le même sens que dans chaque tâche indépendamment, le bruit brut était toujours le bruit choisi le plus souvent comme étant le plus dérangeant.

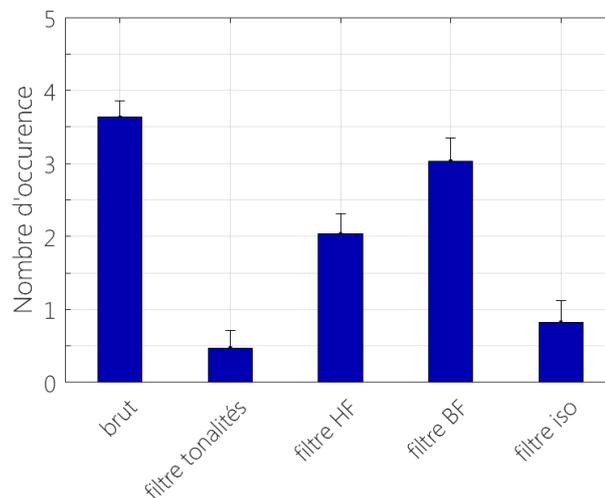


Figure 103 : Graphique représentant les résultats des comparaisons par paires combinés des trois premières expérience ayant pour but de définir le bruit le plus dérangeant

3.4.2. Résultat de l'équation de confort d'Airbus Helicopters

Les résultats de l'équation de confort d'Airbus Helicopters vont dans le sens des résultats subjectifs que nous avons obtenus. En effet, d'après l'équation, le bruit brut était considéré comme le moins confortable, suivi du filtre basses-fréquences, du filtre hautes-fréquences. Le bruit filtré sur toutes les tonalités a été celui calculé comme le plus confortable. Ces résultats sont équivalents à ceux obtenus grâce aux comparaisons par paires des trois tâches. Les calculs d'acuité (Figure 105), de tonalité (Figure 106) et de sonie (Figure 107) ont également fourni par Airbus Helicopters. Ces dernières mesures montrent que le bruit brut possède des indices de tonalités et de sonie les plus élevés, bien que le bruit filtré sur les tonalités basses

fréquences soit celui dont l'indice d'acuité est le plus élevé. Ainsi le caractère désagréable de ces bruits ne se joue pas seulement sur leur intensité mais également sur la présence de tonalités hautes fréquences.

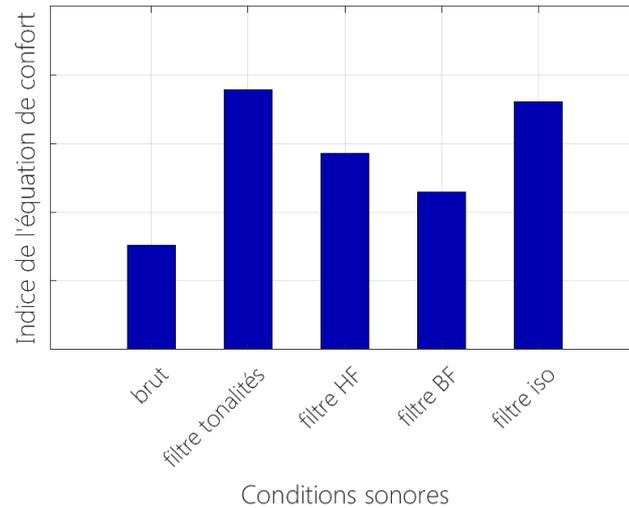


Figure 104 : Indice de l'équation de confort des cinq bruits d'hélicoptère

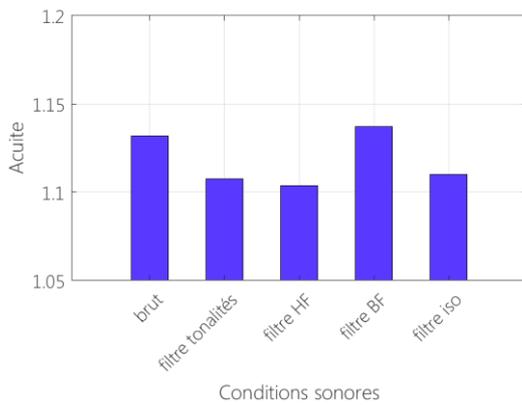


Figure 105 : Indice d'acuité

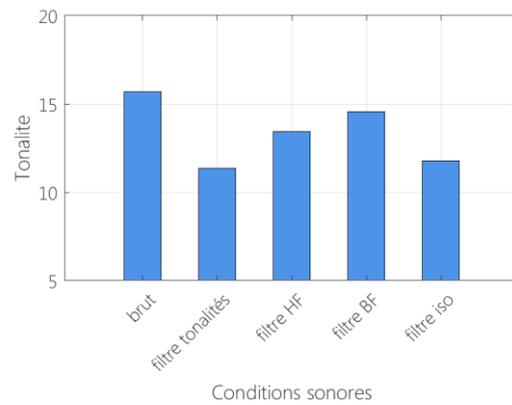


Figure 106 : Indice de tonalité

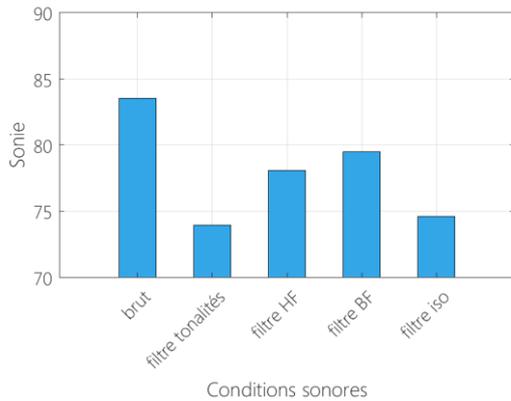


Figure 107 : Indice de sonie

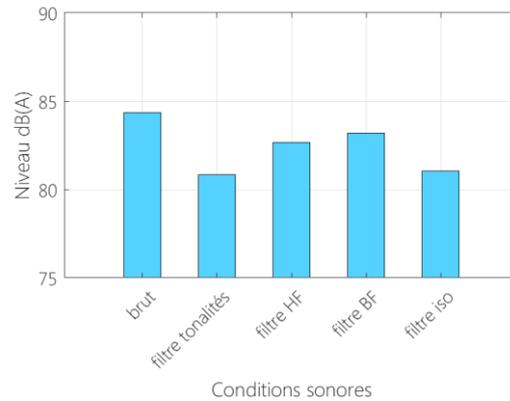


Figure 108 : Niveau en dB(A)

3.4.3. Résumé des résultats combinées des trois tâches

Les analyses des trois expériences combinées ont révélé que les tâches n'avaient pas particulièrement d'effet sur le ressenti subjectif, à l'exception de la fatigue et de l'engagement dans la tâche. La TNT a été la tâche pour laquelle l'engagement était le plus fort. De plus, le niveau de fatigue semblait diminuer davantage durant la TNT. Concernant les conditions sonores, les dimensions du SSSQ ont révélé être plus importantes pour le bruit brut comparé au silence et pour le bruit filtré en basses-fréquences comparé au bruit filtré sur toutes les tonalités. Le bruit filtré sur toutes les tonalités semblerait être le bruit jugé le moins aigu, tandis que le bruit brut serait le plus agaçant et le plus fatigant. Finalement, les comparaisons par paires ont confirmé les résultats déjà obtenus indépendamment sur chacune des expériences, montrant que le bruit brut était choisi comme le plus dérangeant.

3.5. ETUDE COMPLEMENTAIRE : IMPACT D'UN BRUIT D'HELICOPTERE FLUCTUANT

Durant cette expérience complémentaire, les participants réalisaient trois tâches cognitives (TNT, lecture et tâche de l'horloge) en fonction de trois conditions sonores (silence, bruit d'hélicoptère stationnaire, bruit d'hélicoptère fluctuant).

Des ANOVA 3 x 3 à mesures répétées ont été réalisées pour évaluer l'effet du temps et des conditions sonores durant les trois tâches de cette expérience.

3.5.1. Résultats subjectifs

Difficulté ressentie

L'analyse des résultats en fonction du temps n'a pas révélé d'effet significatif [$F(8,104) = 1.23, p = 0.29, \eta_p^2 = 0.09$; Figure 109].

Les résultats ont montré un effet principal significatif de la tâche [$F(2,26) = 45.44, p < 0.01, \eta_p^2 = 0.78$; Figure 110]. Le test Post-Hoc LSD a révélé que la TNT était jugée plus difficile que les autres tâches ($p < 0.01$). Les résultats ont montré un effet principal significatif des conditions sonores [$F(2,26) = 9.73, p < 0.01, \eta_p^2 = 0.43$]. Les tâches réalisées avec le bruit fluctuant ont été jugées plus difficiles ($p < 0.01$). L'interaction n'a pas révélé d'effet significatif [$F(4,52) = 1.62, p = 0.18, \eta_p^2 = 0.11$].

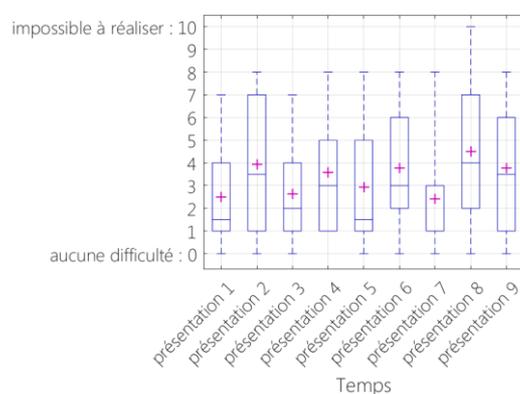


Figure 109 : Difficulté ressentie au cours du temps durant l'étude complémentaire

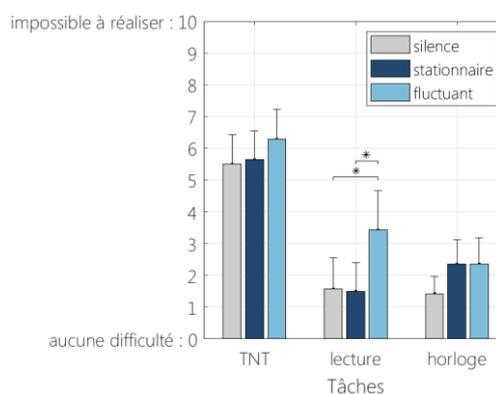


Figure 110 : Difficulté ressentie en fonction des conditions sonores et des tâches réalisées durant l'étude complémentaire

Fatigue ressentie

Les résultats de cette analyse n'ont pas montré d'effet significatif du temps concernant le niveau de fatigue subjective [$F(9,117) = 1.61, p = 0.12, \eta_p^2 = 0.11$; Figure 111 ; Figure 112].

Les résultats de cette analyse ont montré un effet principal significatif de la tâche [$F(2,26) = 3.63, p < 0.05, \eta_p^2 = 0.22$]. Le test Post-Hoc de LSD a révélé que la fatigue ressentie durant la tâche de l'horloge était plus importante que durant les autres tâches ($p < 0.05$). L'analyse n'a pas révélé d'effet significatif des conditions sonores [$F(2,26) = 0.23, p = 0.80, \eta_p^2 = 0.03$], ni d'interaction des tâches et des conditions sonores [$F(4,52) = 1.99, p = 0.11, \eta_p^2 = 0.13$].

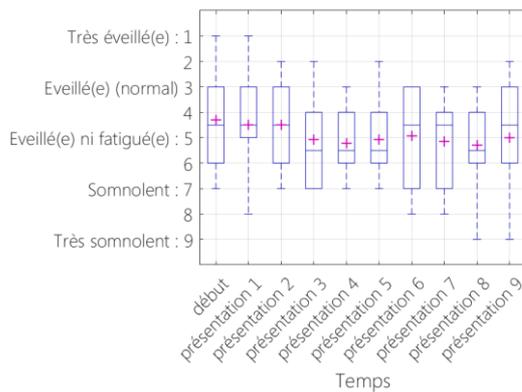


Figure 111 : Fatigue ressentie au cours du temps durant l'étude complémentaire

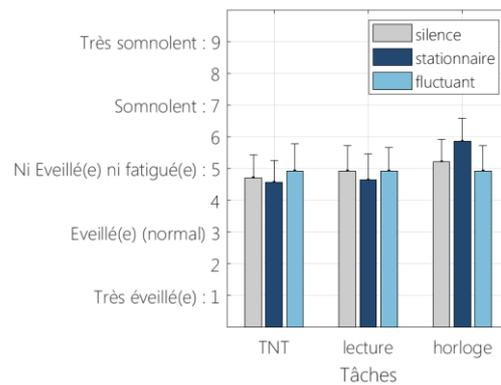


Figure 112 : Fatigue ressentie en fonction des conditions sonores et des tâches réalisées durant l'étude complémentaire

SSSQ

L'analyse des trois dimensions du SSSQ en fonction du temps a révélé un effet principal significatif des dimensions du SSSQ [$F(2,26) = 41.38, p < 0.01, \eta_p^2 = 0.76$]. Le test Post-Hoc LSD a montré que l'indice de la dimension de l'engagement dans la tâche était plus haut que les autres dimensions ($p < 0.05$). L'analyse n'a pas révélé un effet principal significatif du temps [$F(8,104) = 2.09, p < 0.05, \eta_p^2 = 0.14$]. Les indices du SSSQ ont globalement diminué en fonction du temps ($p < 0.05$). Finalement, l'analyse n'a révélé d'interaction significative entre les dimensions du SSSQ et le temps [$F(16,208) = 1.11, p = 0.35, \eta_p^2 = 0.08$]. L'effet du temps a été retrouvé sur toutes les dimensions globalement et non une en particulier.

L'analyse des trois dimensions du SSSQ en fonction des conditions sonores n'a pas révélé d'effet principal de la tâche [$F(2,26) = 1.06, p = 0.36, \eta_p^2 = 0.08$]. L'analyse n'a pas révélé un effet principal des conditions sonores [$F(2,26) = 0.02, p = 0.98, \eta_p^2 = 0.00$]. L'interaction entre les dimensions du SSSQ et la tâche a montré un effet significatif [$F(4,52) = 4.00, p < 0.01, \eta_p^2 = 0.24$]. Le test Post-Hoc LSD a révélé que le stress était plus important durant la TNT comparée aux deux autres tâches. L'inquiétude était plus faible lors de la TNT que lors de la tâche de lecture. L'interaction entre les dimensions du SSSQ et les sons n'a pas révélé d'effet significatif [$F(4,52) = 1.91, p = 0.2, \eta_p^2 = 0.13$]. L'interaction entre les tâches et les sons n'a pas révélé d'effet significatif [$F(4,52) = 0.82, p = 0.52, \eta_p^2 = 0.06$]. Finalement, la triple interaction entre les dimensions du SSSQ les tâches et les sons a révélé un effet significatif [$F(8,104) = 2.06, p < 0.05, \eta_p^2 = 0.14$]. Les résultats du test Post-Hoc LSD sont présentés dans la Figure 113.

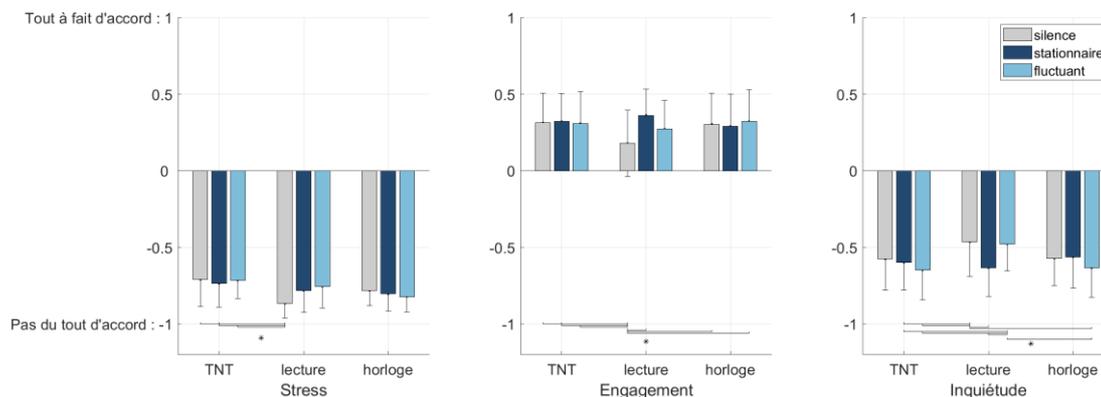


Figure 113 : Dimensions du SSSQ en fonction des tâches et des conditions sonores durant l'étude complémentaire.

Evaluation subjective des conditions sonores

Les résultats en fonction du temps ne montrent aucun effet significatif quel que soit l'item d'évaluation subjective. Le Tableau 16 présente un résumé des résultats obtenus en fonction des conditions sonores (contrairement aux autres tableaux, les tests de Wilcoxon non significatifs sont représentés par un #). Le silence a été jugé moins fluctuant, moins distrayant, moins agaçant, moins fatigant et moins stressant. Globalement, le bruit fluctuant a été perçu plus distrayant durant les tâches TNT et de lecture. Il était également jugé comme étant le plus agaçant.

Tableau 16 : Résumé des résultats de l'évaluation subjective des conditions sonores sur les trois tâches de l'expérience complémentaire. Les données dans le tableau représentent la moyenne \pm écart-type. Les # représentent un test de Wilcoxon non significatif avec les conditions en exposant.

Conditions sonores	TNT			Lecture			Horloge		
	1 : silence	2 : stationnaire	3 : fluctuant	4 : silence	5 : stationnaire	6 : fluctuant	7 : silence	8 : stationnaire	9 : fluctuant
Fluctuation	1.0 \pm 0.0	3.1 \pm 1.3 # 5,8	3.9 \pm 2.0 # 6,9	1.1 \pm 1.2	2.4 \pm 1.2 # 2,8	4.2 \pm 2.3 # 3,9	1.0 \pm 1.4	2.2 \pm 1.4 # 2,5	2.9 \pm 1.7 # 3,6
Distraction	1.0 \pm 0.0	3.0 \pm 1.3 # 5,6,8,9	4.1 \pm 2.2 # 2,6	1.1 \pm 0.3	2.4 \pm 1.5 # 2,8,9	4.5 \pm 2.4 # 2,3,9	1.0 \pm 0.0	2.5 \pm 1.4 # 6,9	3.6 \pm 2.0 # 2,5,6,8
Agacement	1.0 \pm 0.0	2.6 \pm 1.8 # 5,6,8,9	5.6 \pm 1.6 # 6	1.0 \pm 0.0	2.3 \pm 1.8 # 2,8	5.5 \pm 1.9 # 2,3,9	1.0 \pm 0.0	2.6 \pm 2.0 # 2,5	6.2 \pm 1.0 # 2,6
Fatigant	1.0 \pm 0.0	2.9 \pm 1.7 # 3,5,6,9	4.2 \pm 2.1 # 2,6,8,9	1.0 \pm 0.0	2.5 \pm 1.8 # 2,6,8	3.9 \pm 2.1 # 2,3,5,8,9	1.0 \pm 0.0	3.4 \pm 1.7 # 3,5,6,9	3.9 \pm 1.8 # 2,3,6,8
Habitué	3.1 \pm 3.0 # 3,6,8,9	5.1 \pm 1.4 # 3,5,8,9	3.9 \pm 1.9 # 1,2,4,6,7,8,9	3.0 \pm 2.8 # 3,6,8	5.6 \pm 1.7 # 2,9	3.8 \pm 2.0 # 1,3,4,7,8,9	3.1 \pm 3.0 # 3,6,8,9	4.2 \pm 2.0 # 1,2,3,4,6,7,9	4.6 \pm 1.5 # 1,2,3,5,6,7,8
Stressant	1.0 \pm 0.0	2.0 \pm 1.2 # 5,8	2.0 \pm 1.2 # 5,6,9	1.0 \pm 0.3	2.6 \pm 2.0 # 2,3,6,8,9	2.6 \pm 2.0 # 3,5,9	1.0 \pm 0.0	2.1 \pm 1.3 # 2,5	2.1 \pm 1.3 # 3,5,6

3.5.2. Résultats comportementaux

Nous avons analysé les performances obtenues lors des trois tâches : TNT, lecture, vigilance (horloge). Pour la TNT, les performances mesurées étaient le nombre de réponses correctes et incorrectes et les temps de réaction lorsque les participants répondaient juste (temps de réaction pour les bonnes réponses uniquement). Pour la tâche de lecture, les temps de lecture, en fonction des conditions sonores, du temps et des textes ont été analysés. Pour finir, le nombre de sauts détectés et manqués, les fausses alarmes ainsi que les temps de réaction ont été analysés.

TNT

Nombre de réponses correctes

Concernant le nombre de bonnes réponses, l'analyse n'a pas révélé d'effet principal des conditions sonores [$F(2,26) = 0.52$, $p = 0.60$, $\eta_p^2 = 0.04$; Figure 114]. L'analyse a révélé un effet significatif de la difficulté de n-back [$F(2,26) = 92.56$, $p < 0.01$, $\eta_p^2 = 0.88$]. Les participants ont réalisé plus de bonnes réponses lors de la condition 0-back que la condition 2-back. L'analyse n'a pas révélé d'interaction entre les conditions sonores et la difficulté n-back [$F(4,52) = 0.53$, $p = 0.72$, $\eta_p^2 = 0.04$].

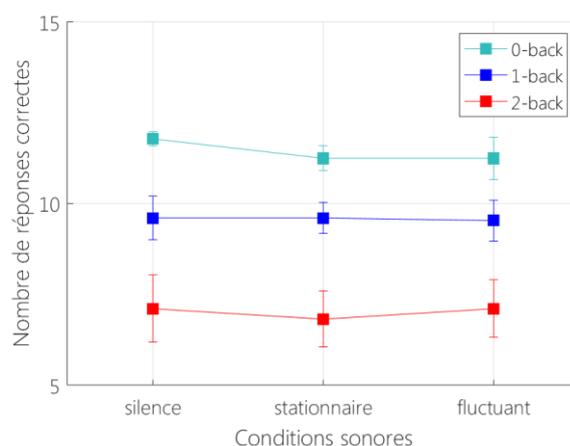


Figure 114 : Nombre de réponses correctes en fonction des conditions sonores durant la tâche TNT de l'étude complémentaire

Nombre d'erreurs

Concernant le nombre d'erreurs, l'analyse n'a pas révélé d'effet principal des conditions sonores [$F(2,26) = 0.52, p = 0.60, \eta_p^2 = 0.04$]. L'analyse a révélé un effet significatif de la difficulté de n-back [$F(2,26) = 28.29, p < 0.01, \eta_p^2 = 0.69$]. Les participants ont réalisé plus d'erreurs lors de la condition 2-back que la condition 0-back. L'analyse n'a pas révélé d'interaction entre les conditions sonores et la difficulté n-back [$F(4,52) = 0.53, p = 0.72, \eta_p^2 = 0.04$].

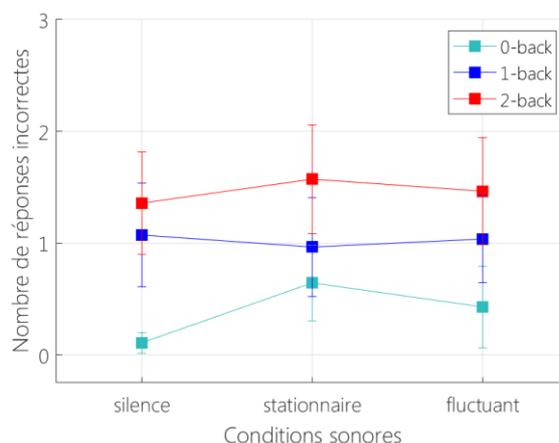


Figure 115 : Nombre de réponses incorrectes en fonction des conditions sonores durant la tâche TNT de l'étude complémentaire

Temps de réaction

Concernant les temps de réaction, l'analyse n'a pas révélé d'effet principal des conditions sonores [$F(2,26) = 1.33, p = 0.28, \eta_p^2 = 0.09$]. L'analyse a révélé un effet significatif de la difficulté de n-back [$F(2,26) = 44.63, p < 0.01, \eta_p^2 = 0.77$]. Les participants ont réalisé plus d'erreurs lors de la condition 2-back que la condition 0-

back. L'analyse n'a pas révélé d'interaction entre les conditions sonores et la difficulté n-back [$F(4,52) = 0.68, p = 0.61, \eta_p^2 = 0.05$].

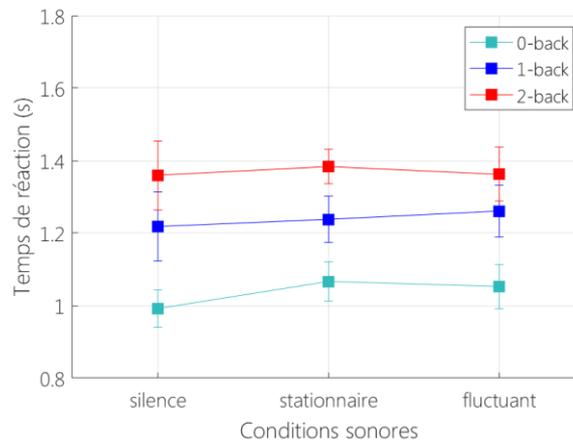


Figure 116 : Temps de réaction en fonction des conditions sonores durant la tâche TNT de l'étude complémentaire

Lecture

Nous avons trouvé un effet significatif du temps [$F(2,26) = 4.56, p < 0.05, \eta_p^2 = 0.26$; Figure 117] sur le temps de lecture des participants. Les participants ont lu plus rapidement le dernier texte qui leur était présenté avec en moyenne 250 ± 61 s pour le premier texte, 253 ± 69 s pour le deuxième texte et 230 ± 68 s pour le dernier texte.

En revanche, le temps de lecture n'était pas significativement différent en fonction des conditions sonores [$F(2,26) = 1.22, p = 0.31, \eta_p^2 = 0.09$; Figure 117].

Les textes ont été lus à des vitesses équivalentes, il n'y avait pas de différence significative de leur durée de lecture [$F(2,26) = 1.0, p = 0.38, \eta_p^2 = 0.07$; Figure 117].

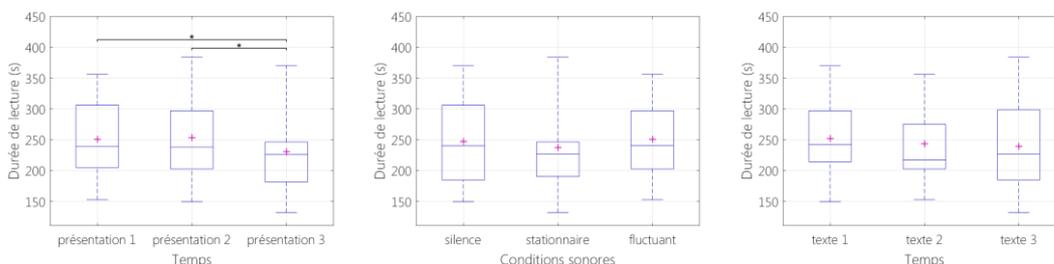


Figure 117 : Temps de lecture des textes durant la tâche de lecture de l'étude complémentaire en fonction du temps (à gauche), en fonction des conditions sonores (au milieu), en fonction des textes (à droite)

Vigilance

Sauts détectés

L'analyse n'a pas révélé d'effet significatif du temps [$F(2,26) = 0.22, p = 0.80, \eta_p^2 = 0.02$; Figure 118]. Le nombre de sauts détectés n'a été amélioré ou dégradé au fur des passations. L'analyse n'a pas non plus révélé d'effet significatif des conditions sonores [$F(2,26) = 1.15, p = 0.33, \eta_p^2 = 0.08$; Figure 119]. Cependant la moyenne du nombre de sauts détectés était plus élevée en condition silencieuse ($M = 35.43 \pm 1.40$) que durant les conditions avec du bruit (bruit stationnaire : $M = 34.79 \pm 1.48$; bruit fluctuant : $M = 34.71 \pm 1.73$) [$t(13) = 5.65, p < 0.01$; Figure 120].

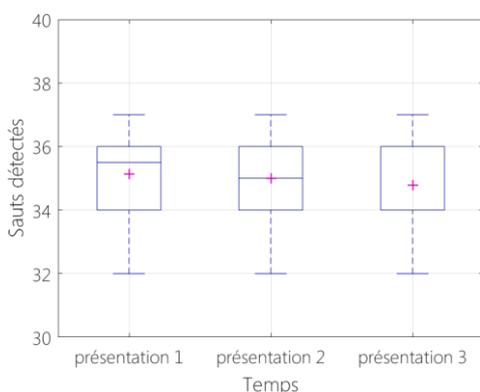


Figure 118 : Nombre de sauts détectés en fonction du temps de la tâche de l'horloge durant l'étude complémentaire

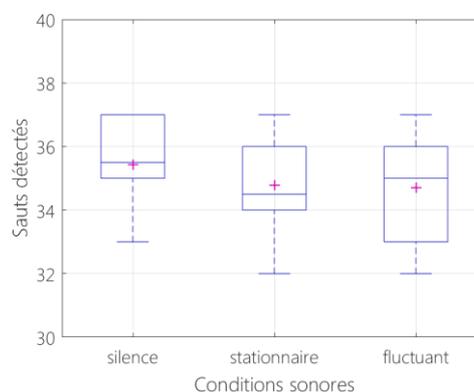


Figure 119 : Nombre de sauts détectés en fonction des conditions sonores de la tâche de l'horloge durant l'étude complémentaire

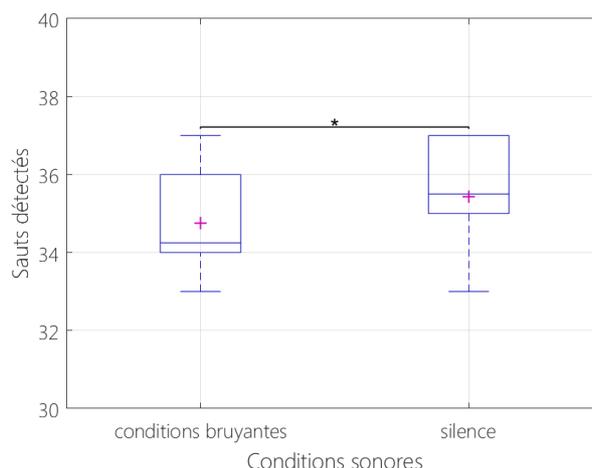


Figure 120: Nombre de sauts détectés moyennés sur les conditions bruyantes vs silence lors de la tâche de l'horloge

Sauts manqués

Le nombre de saut manqués n'a pas révélé d'effet significatif du temps [$F(2,26) = 0.15, p = 0.86, \eta_p^2 = 0.01$; Figure 121]. L'analyse n'a pas non plus révélé d'effet significatif des conditions sonores [$F(2,26) = 0.81, p = 0.45, \eta_p^2 = 0.06$; Figure 122]. Cependant, on peut noter que le nombre de sauts manqués était moins élevé durant la condition silencieuse comparé aux conditions bruyantes (silence : $M = 1.50 \pm 1.34$; bruit stationnaire : $M = 2.07 \pm 1.49$; bruit fluctuant : $M = 2.07 \pm 1.81$) [$t(13) = 5.65, p < 0.01$; Figure 123].

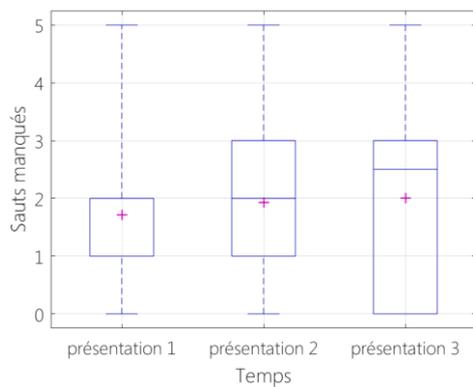


Figure 121 : Nombre de sauts manqués en fonction du temps de la tâche de l'horloge durant l'étude complémentaire

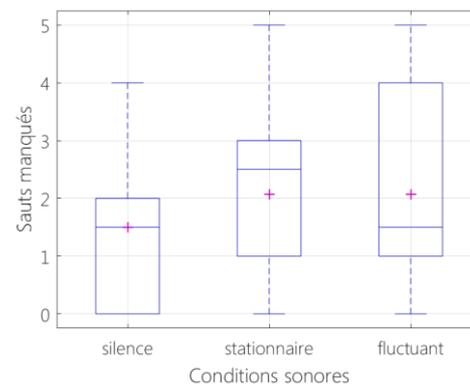


Figure 122 : Nombre de sauts manqués en fonction des conditions sonores de la tâche de l'horloge durant l'étude complémentaire

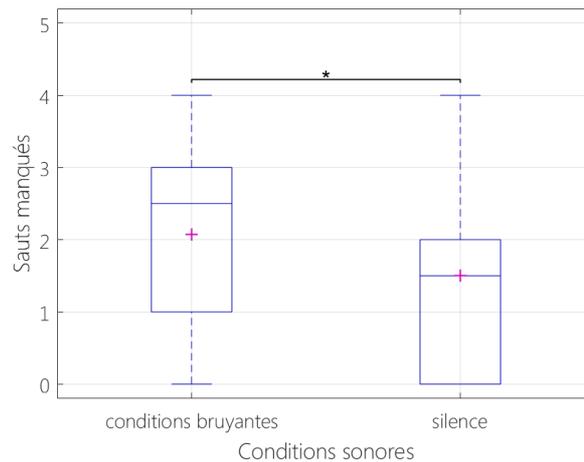


Figure 123 : Nombre de sauts manqués moyennés sur les conditions bruyantes vs silence lors de la tâche de l'horloge

Fausses alarmes

Le nombre de fausses alarmes n'a pas révélé d'effet significatif du temps [$F(2,26) = 0.98, p = 0.39, \eta_p^2 = 0.07$] ni d'effet significatif des conditions sonores [$F(2,26) = 0.23, p = 0.79, \eta_p^2 = 0.02$].

Temps de réaction

Le temps de réaction des participants n'a pas révélé d'effet significatif du temps [$F(2,26) = 0.84, p = 0.44, \eta_p^2 = 0.06$], ni d'effet significatif des conditions sonores [$F(2,26) = 1.34, p = 0.28, \eta_p^2 = 0.09$].

3.5.3. Résultats des corrélations des tâches

Le tableau suivant (Tableau 17) présente les statistiques descriptives de la personnalité des participants. Les résultats des corrélations n'ont pas montré de résultats particulièrement significatifs. Le Tableau 23 (Annexe 6, p.235) résume ces résultats.

Tableau 17 : Statistiques descriptives de la personnalité du groupe de participants ayant réalisés l'étude complémentaire

	Sensibilité au bruit	Neuroticisme	Extraversion
Moyenne	21.6	2.1	3.6
Ecart-type	5.2	1.2	2.3
Médiane	22.0	2.0	4.5

3.5.4. Résultats psychophysologiques

L'étude des mesures psychophysologiques s'est portée sur l'analyse du rythme cardiaque (BPM) et sa variabilité en fonction du temps et des conditions sonores.

ECG*BPM*

L'analyse du rythme n'a pas montré d'effet principal significatif du temps [$F(8,24) = 0.65, p = 0.73, \eta_p^2 = 0.18$]. L'analyse en fonction des conditions sonores n'a pas montré d'effet principal significatif de la tâche [$F(2,6) = 0.32, p = 0.74, \eta_p^2 = 0.09$] ni des conditions sonores [$F(2,6) = 0.43, p = 0.67, \eta_p^2 = 0.12$]. L'interaction des deux n'a pas révélé d'effet significatif [$F(4,12) = 2.86, p = 0.07, \eta_p^2 = 0.49$].

L'analyse du rythme cardiaque des conditions bruyantes vs le silence a montré qu'il n'y avait pas d'effet significatif de la tâche [$F(2,48) = 2.62, p = 0.08, \eta_p^2 = 0.10$; Figure 124]. L'analyse a cependant révélé un effet principal significatif du bruit [$F(1,48) = 8.81, p < 0.01, \eta_p^2 = 0.16$; Figure 125]. Le test Post-Hoc LSD a révélé que le rythme cardiaque moyen durant les conditions bruyantes était plus élevé qu'en condition silencieuse. Finalement, l'analyse n'a pas révélé d'interaction significative entre la tâche et le bruit [$F(2,48) = 0.66, p = 0.53, \eta_p^2 = 0.03$].

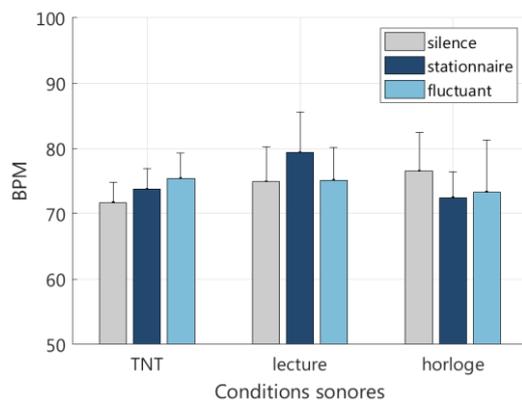


Figure 124 : Rythme cardiaque en fonction des conditions sonores et des tâches durant l'étude complémentaire

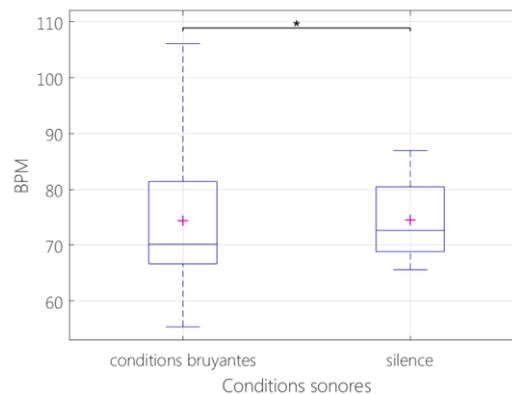


Figure 125 : Rythme cardiaque moyenné sur l'ensemble des conditions bruyantes vs le silence durant l'étude complémentaire

NN50

L'analyse de la HRV via l'indice NN50 n'a pas montré d'effet principal significatif du temps [$F(8,24) = 1.16, p = 0.36, \eta_p^2 = 0.28$]. L'analyse en fonction des conditions sonores n'a pas montré d'effet principal significatif de la tâche [$F(2,6) = 0.11, p = 0.90, \eta_p^2 = 0.03$; Figure 126] ni des conditions sonores [$F(2,6) = 0.09, p = 0.91, \eta_p^2 = 0.02$]. L'interaction des deux n'a pas révélé d'effet significatif [$F(4,12) = 0.42, p = 0.79, \eta_p^2 = 0.12$].

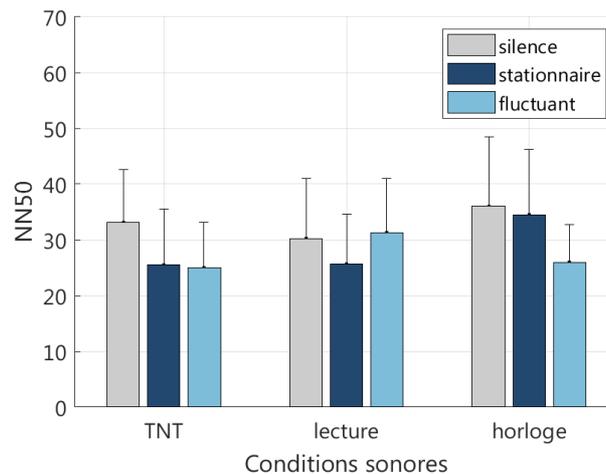


Figure 126 : Indice NN50 en fonction des conditions sonores et des tâches durant l'étude complémentaire

3.5.5. Résumé des résultats de l'étude complémentaire

Contrairement aux autres analyses, cette étude n'a pas montré d'effet significatif du temps sur le ressenti subjectif. Seul le temps de lecture s'est amélioré en fonction du temps, mais cet effet a été interprété comme un effet d'habituation à la tâche. Cependant, les performances cognitives étaient améliorées avec le temps. Ce résultat suggère que les participants n'ont pas perçu cette amélioration.

Le seul effet significatif des conditions sonores a été trouvé sur le ressenti de la difficulté, qui a été évaluée plus importante durant la condition du bruit fluctuant. De plus, une analyse du bruit vs silence a montré que la tâche de vigilance a été mieux réussie durant le silence et que le rythme cardiaque a été également moins élevé en condition silencieuse.

4. DISCUSSION

Dans le domaine de l'acoustique hélicoptère, un des enjeux principaux est d'améliorer le confort acoustique des passagers en cabine. En effet, le bruit ressenti durant un vol peut être perçu comme pénible en raison des fortes vibrations et des niveaux sonores élevés, émis sur une large gamme de fréquence (10-12000 Hz). Une solution de contrôle actif au voisinage de la tête a été imaginée par Airbus Helicopters afin de répondre à l'exigence grandissante des passagers en matière de confort acoustique. Le principal objectif de cette thèse était de mettre en œuvre une grande quantité de techniques afin d'évaluer finement l'impact de différentes méthodes de filtrage du bruit d'hélicoptère sur les passagers. Nous avons ainsi réalisé une étude holistique prenant en compte plusieurs dimensions du confort grâce à des mesures subjectives (questionnaires, tests psychométriques), comportementales (performances durant des tâches), psychophysiques (électro-encéphalographie, électrocardiographie) et oculométriques.

Afin de reproduire les principales activités d'un passager, nous avons défini une tâche de « travail », une tâche de « lecture » et une tâche de « repos ». La tâche de « travail » a été simulée grâce à la *Toulouse N-back Task* (TNT) et consistait en une tâche combinant calcul mental et mémoire de travail. La tâche de « lecture » correspondait à la lecture d'extraits d'un livre de science-fiction. Pour finir, la tâche de « repos » consistait à se détendre tout en regardant une vidéo de défilement de nuages. Les filtres appliqués aux bruits d'hélicoptère tenaient compte des contraintes réelles de l'algorithme de contrôle actif multi-tonalités développé par Macchi (2015). Le critère ayant guidé le choix des paramètres des filtres était de pouvoir contraster des possibilités de filtrage différentes, par exemple en mettant en évidence les tonalités émergentes de la boîte de transmission principale, particulièrement désagréables pour l'oreille humaine. Ainsi, en partant d'un signal acoustique fourni par Airbus Helicopters, le bruit « brut » ou « original », nous avons créé quatre bruits supplémentaires en appliquant quatre filtres distincts, modifiant l'amplitude des tonalités présentes dans la bande 500-3000 Hz. Au final, nous avons disposé de six conditions sonores : le bruit original (non filtré), un bruit filtré sur toutes les tonalités, un bruit filtré sur les tonalités hautes-fréquences, un bruit filtré sur les tonalités basses-fréquences, un bruit sur lequel les tonalités étaient filtrées isophoniquement (en suivant la courbe de pondération A) et une condition de silence. Cette dernière était comparée à toutes les précédentes. Du fait que les cinq bruits étaient de nature stationnaire et non fluctuante, nous avons réalisé une quatrième étude complémentaire ayant pour but d'évaluer l'impact d'un bruit d'hélicoptère fluctuant (décollages et atterrissages) sur les tâches cognitives précédentes (travail, lecture) ainsi que sur une nouvelle tâche de vigilance (tâche de l'horloge).

Les principaux résultats de ce travail de thèse ont montré que les différents bruits se distinguaient majoritairement au travers du ressenti subjectif. Ainsi, le bruit brut a souvent été perçu comme plus agaçant, plus stressant, ou encore plus fatigant. L'appréciation subjective des sons évoluait en fonction des tâches. Par exemple, le bruit brut était considéré comme significativement plus agaçant et fatigant pendant la tâche de travail (TNT), plus intense pendant la tâche de lecture et simplement plus fatigant et non agaçant durant la tâche de repos. L'ensemble des dimensions subjectives des conditions sonores étaient en défaveur des bruits comparés au silence. En effet, la perception du silence était jugée moins agaçante, moins fatigante et moins stressante quelle que soit la tâche réalisée. Nous n'avons pas retrouvé d'effet contrintuitif des bruits, telle qu'une préférence par rapport au silence sur certaines dimensions subjectives.

Nous nous attendions cependant à un impact du bruit en général plus important comparé au silence sur le ressenti subjectif, le comportement et les mesures psychophysiologiques. Cet impact important aurait pu se traduire par un ressenti subjectif dégradé (tel qu'un niveau de stress plus élevé ou encore une fatigue et une gêne générale plus importante), des performances cognitives diminuées et une charge cognitive plus élevée (telle qu'indiquée par l'activité psychophysiologique) en présence de bruit. De plus, nous avons émis l'hypothèse que cet effet du bruit serait plus attendu en présence de bruit tonal. En effet, du fait du caractère particulièrement désagréable du bruit tonal, nous supposons un impact plus important sur ces métriques concernant les bruits présentant le plus de tonalités comparés à ceux filtrés. Etant donné les différences interindividuelles en termes de personnalité et de sensibilité au bruit qui sont des modérateurs de la gêne occasionnée, nous nous attendions à un impact plus fort chez les personnes introverties et sensibles au bruit.

L'analyse des données comportementales révèle également de façon claire et indiscutable que les bruits ont eu très peu d'effet sur la performance cognitive, que ce soit durant la TNT ou la lecture. Le seul résultat significatif du point de vue comportemental concernait la tâche de vigilance (tâche de l'horloge), pour laquelle le taux d'erreur était plus faible en condition silence vs bruyante (tous bruits confondus). A l'exception de cette tâche, les conditions de bruit ne se différençaient jamais sur le plan des performances.

Les activités psychophysiologiques semblent refléter celles obtenues pour des tâches similaires sans exposition au bruit. Notamment, pour une tâche de n-back classique, on peut retrouver une diminution de la puissance alpha sur les aires pariéto-occipitales (Gevins & Smith, 2000). Pour une tâche de lecture, une diminution de la puissance alpha peut être observée sur les aires pariétales (Scharinger, Kammerer, & Gerjets, 2015). Et concernant une tâche de repos une

augmentation de la puissance alpha est retrouvée sur les aires pariéto-occipitales lorsque les yeux des participants sont ouverts (Barry et al., 2007). Si nos analyses psychophysiologiques mettent en évidence assez peu d'effet des différents bruits, nous avons pu tout de même observer que le rythme cardiaque était plus élevé durant les conditions bruyantes (tous bruits d'hélicoptères confondus) par rapport au silence et ce pour l'ensemble des tâches réalisées (TNT, lecture, repos et vigilance).

Au cours de nos analyses, nous avons également examiné l'effet des présentations consécutives des conditions au sein de chaque tâche, autrement dit, l'effet du temps. Excepté pour la tâche de vigilance, ces tests ont montré un effet systématique du temps sur globalement toutes les métriques analysées, subjectives, comportementales et psychophysiologiques. Cet effet se traduisait sur les mesures comportementales par une amélioration des performances pour la TNT et la tâche de lecture. L'effet du temps sur les mesures psychophysiologiques se retrouvait dans certaines métriques EEG et dans la diminution du rythme cardiaque. Ainsi, nous avons observé une augmentation de la puissance du rythme alpha durant la TNT et la tâche de repos ainsi qu'une diminution du rythme gamma et du *Task Load Index* (TLI) durant la TNT. L'augmentation du rythme alpha durant la TNT et la tâche de repos peut être interprétée comme une diminution de la charge cognitive et une baisse de vigilance au cours de l'expérience (Holm et al., 2009). La diminution du rythme gamma durant la TNT peut se traduire par un niveau attentionnel diminué, une fatigue mentale plus importante (Faber et al., 2012 ; Klimesch, 1999 ; Lal & Craig, 2002 ; Oken et al., 2006 ; Zhao et al., 2012) et une charge cognitive plus diminuée (So, Wong, Mak, & Chan, 2017). La diminution du TLI durant la TNT a pu révéler une diminution de la charge cognitive. Ces résultats peuvent être résumés comme une réduction de la charge mentale et du stress au fur et à mesure des répétitions des tâches. Nous privilégions l'hypothèse d'une diminution de la charge cognitive liée à l'entraînement à la tâche plutôt que de l'habituation aux sons. En effet, les performances à la tâche s'amélioraient au fur et à mesure du temps et les différentes conditions sonores se distinguaient assez peu du silence sur le plan physiologique. Nous ne pouvons tout de même pas exclure un effet de la fatigue en plus de la diminution de la charge cognitive puisque le questionnaire de fatigue montrait une augmentation de celle-ci entre le début et la fin de l'expérience.

Les performances cognitives durant la TNT et la tâche de lecture n'ont pas été impactées par les conditions sonores ou par le bruit en général. Cette absence d'impact du bruit sur les performances cognitives est largement retrouvée dans la littérature. Par exemple, dans l'étude de Ryherd & Wang (2007, 2008), le bruit tonal impactait seulement le ressenti subjectif et non les performances lors de tâches cognitives. Les chercheurs ont également montré que le ressenti pouvait être un

modulateur de la baisse de performance, ainsi, lorsque ce dernier était estimé très négatif, les performances déclinaient. Dans d'autres cas le ressenti peut être dégradé alors que les performances réelles peuvent être meilleures avec du bruit. Bayssie et al. (2004) ont montré que lors d'une tâche difficile, un bruit d'avion pouvait conduire certains sujets à une amélioration des performances à la tâche. Dans cette étude, les participants ont relevé une gêne liée au bruit sans pour autant être impactés par ce dernier. Nos résultats subjectifs n'ont pas forcément reflété les caractéristiques réelles des signaux sonores. Par exemple, dans les résultats combinés des trois premières expériences, le bruit considéré comme étant le plus tonal était le bruit filtré en hautes-fréquences. Nous nous attendions à ce que le bruit brut ou le bruit filtré en basses-fréquences soient perçus comme les plus tonals, en raison de la présence de tonalités hautes-fréquences (entre 1500 et 3000 Hz) proches de celles de la parole. Malgré le caractère tonal des bruits, un effet de masquage a pu intervenir par la présence du bruit aérodynamique qui est un bruit large bande, qui peut diminuer l'effet de gêne occasionné par les tonalités. Ainsi, après des entretiens informels réalisés à la fin des expériences, la majorité des sujets n'a pas estimé avoir été notablement perturbé par les bruits d'hélicoptère. Étonnamment, une participante en particulier a reporté (de manière informelle) apprécier davantage les conditions bruyantes et être « angoissée » par le silence. Elle faisait toutefois partie de la population de personnes extraverties. Nous aurions pu imaginer que différentes phases de vol pendant lesquelles le bruit aérodynamique n'est pas aussi présent (comme le décollage ou l'atterrissage) auraient pu être plus désagréables. L'étude complémentaire qui a justement permis de tester ce type de bruit n'a pourtant pas montré d'impact du bruit. Cependant, le bruit qui a été utilisé n'était pas particulièrement tonal. Nous ne pouvons donc conclure que le bruit aérodynamique a bel et bien masqué les tonalités.

Cependant, il est intéressant de noter qu'il y avait davantage de métriques psychophysiologiques impactées par le temps durant la tâche TNT que durant les tâches de lecture et de repos. Ce résultat suggère que la TNT, étant une tâche très exigeante, nécessitait un effort d'apprentissage prolongé pouvant être traduit par une charge cognitive initiale accrue et s'atténuant au fur et à mesure du temps. De ce point de vue, la tâche de vigilance ne présentait pas d'effet du temps, très certainement car sa réalisation est simpliste et ne nécessite aucun apprentissage.

Les différences subjectives entre les bruits suggèrent également que le bruit brut pourrait entraîner plus rapidement de la fatigue mentale ou du stress. En effet, les performances cognitives se sont améliorées dans le temps en parallèle d'une fatigue subjective augmentée. Ainsi, en plus de refléter un effet de fatigue général dû à l'accomplissement de la tâche au court du temps, la fatigue subjective pourrait également refléter la fatigue due à la mobilisation de ressources cognitives

supplémentaires pour faire face au bruit (*coping*). En effet, le bruit engendrerait un coût qui ne se mesure pas par les performances mais par le ressenti subjectif de la fatigue.

Pour cette raison, en présence du son tonal versus les autres conditions sonores ou en présence des sons vs le silence, nous nous attendions à une augmentation de la charge cognitive et de l'activité cardiaque en raison d'un coût physiologique plus important. Cette surconsommation de ressources cognitives peut refléter la réponse compensatoire induite par des stratégies d'adaptation (*coping*) au stress sonore (Mandrick et al., 2016 ; Robert & Hockey, 1997). Bien que les analyses n'aient pas révélé d'effet significatif entre les conditions sonores, les résultats montrent qu'en moyenne le rythme cardiaque lors de l'exposition aux conditions bruyantes était plus important que durant le silence, quelle que soit la tâche réalisée. Ceci pourrait indiquer une stratégie de coping efficace puisque les performances n'étaient pas impactées. Cet effet global du bruit et l'absence de contraste entre les cinq bruits tendent à montrer que les effets des différents filtres sonores étaient probablement trop faibles pour avoir un effet physiologique. Cela étant, l'effet global de la condition bruyante (tout bruit confondu) sur l'activité cardiaque suggère qu'une exposition plus longue pourrait entraîner une certaine fatigue cognitive si l'hypothèse du coping était vérifiée (voir par exemple: Evans et al., 1995). Une autre hypothèse expliquant cette absence d'effet pourrait provenir des niveaux sonores élevés utilisés durant les expériences qui auraient pu générer un réflexe stapédien. Ce phénomène se produit à partir de niveau élevé de bruit (80 dB) et a pour but de d'atténuer son effet (de environ 10 dB) pour protéger l'oreille à une exposition de 2s à quelques minutes (Dancer, 1991). Ce réflexe aurait pu diminuer les effets des bruits d'hélicoptères qui étaient présentés à des niveaux de plus de 80 dB(A). Les déficits auditifs comme les synaptopathies cochléaires ont été écartés comme explications dans notre cas, nos études ne portaient pas sur la parole et sa compréhension.

Un autre résultat remarquable était le nombre d'effets significatifs sur l'analyse de l'évaluation subjective des bruits, dont une différence notable pouvait être observée entre les tâches cognitives. Le nombre de différences significatives reportées entre les sons était nettement plus important durant la tâche de repos (nombre de tests significatifs : 90) que pendant la tâche TNT (nombre de tests significatifs : 66) et la tâche de lecture (nombre de tests significatifs : 63). Il semblerait qu'en fonction du degré d'engagement cognitif, les participants aient discriminé les bruits différemment. Ici, pour les tâches les moins exigeantes cognitivement (lecture et repos), les participants ont perçu les bruits avec plus de précision et ont été capables d'en dégager davantage de différences caractéristiques. Les tâches cognitives nous rendraient plus « hermétiques » aux bruits. C'est en effet ce qu'ont reporté les participants, ils étaient tellement

concentrés sur les tâches qu'ils portaient une attention moindre aux bruits et s'y habituaient donc très facilement. Cet effet lié à l'exigence des tâches peut s'illustrer d'une autre manière dans la littérature. Lorsque beaucoup de ressources cognitives sont engagées dans une tâche difficile, un phénomène de surdité « inattentionnelle » peut survenir pouvant générer une incapacité à la détection d'alarme auditive (Dehais et al., 2014 ; Giraudet et al., 2015). Cependant, ce phénomène survient pour des stimuli auditifs soudains alors que nos conditions sonores étaient continues et stationnaires.

Il est également à noter que les bruits utilisés dans les trois premières études étaient très peu fluctuants. Cela pourrait expliquer le faible impact des bruits sur les performances. En effet, ces bruits ont été sélectionnés durant une phase de vol en avancement, qui induit un bruit stationnaire. Nous voulions ainsi, représenter le bruit le plus représentatif, c'est-à-dire, celui entendu le plus longtemps par un passager durant un vol. Cela nous permettait également de faciliter le traitement des signaux pour reproduire l'effet d'un contrôle actif multi-tonalités. Il a cependant été montré qu'un bruit intermittent ou fluctuant était particulièrement délétère sur une tâche impliquant la mémoire de travail (Muzammil & Hasan, 2004 ; Salamé & Wittersheim, 1978 ; A. P. Smith, 1989 ; Tremblay et al., 2001). Nous avons donc réalisé l'étude complémentaire pour visualiser cet effet sur la TNT et la tâche de lecture. Un autre effet surprenant d'un bruit fluctuant ou intermittent est son effet excitateur durant une tâche monotone de vigilance (Hockey, 1970 ; Szalma & Hancock, 2011). Ainsi nous voulions tester cet effet sur une tâche de vigilance, la tâche de l'horloge (Mackworth, 1950). Cependant, nous n'avons pas non plus retrouvé d'effet des conditions sonores sur les performances durant la TNT et la tâche de lecture, ni par un bruit d'hélicoptère stationnaire ni par un bruit d'hélicoptère fluctuant. Seule la tâche de vigilance était impactée avec un nombre de sauts manqués plus important en présence du bruit vs silence. Par ailleurs, certains participants ont remarqué être plus motivés et stimulés lors de l'exposition au bruit fluctuant. Il semblerait donc que cet effet excitateur dépende des personnes. Pourtant, à ce niveau aussi, nous n'avons pas noté d'effet de la personnalité sur les performances aux tâches.

D'après la littérature, la personnalité est un des plus gros modérateurs de l'impact du bruit sur les performances (Szalma & Hancock, 2011). Malgré cela, nous n'avons pas retrouvé cet effet dans nos résultats. Nos résultats n'ont pas montré de corrélations particulières entre les performances aux tâches ou le ressenti subjectif et la personnalité. Néanmoins, une corrélation s'est distinguée des autres indiquant que les personnes extraverties ressentaient plus de difficulté durant le niveau 2-back de la TNT. A part cet effet, les personnes ayant des personnalités introverties ou étant sensibles au bruit n'ont pas eu de performances particulièrement plus dégradées que les personnes extraverties. Cependant, il est important de souligner

que nos participants étaient plus souvent de personnalité extravertie (66 % d'entre eux). En effet, les participants étaient recrutés sur la base du volontariat, or il a été montré que l'extraversion était associée à une motivation à faire du volontariat plus importante (Carlo, Okun, Knight, & de Guzman, 2005). Des groupes de participants avec une variabilité de personnalités équivalente seraient nécessaires pour mettre en lumière des différences liées à l'impact du bruit sur la personnalité.

Une limite de notre étude concerne la durée d'exposition. Les auteurs présentent des résultats contradictoires concernant les effets de la durée d'exposition au bruit. Certains suggèrent qu'une durée d'exposition longue (> 30 minutes) sera plus délétère qu'une exposition courte, en raison de la fatigue et du stress généré (Evans et al., 1995 ; A. P. Smith & Broadbent, 1985). D'autres établissent qu'une exposition courte (< 1 minutes) aurait davantage d'effets négatifs sur la performance pour laquelle l'effet n'est pas atténué par une habituation (Szalma & Hancock, 2012). Finalement, la durée d'exposition dans nos expériences était relativement moyenne comparée à celles de la littérature (7 minutes d'exposition au bruit en comptant 2 minutes d'habituation). Etant donné le caractère stationnaire des bruits, nous supposons qu'une exposition plus longue et plus proche de celle subie par un passager aurait pu avoir des effets plus importants sur les performances cognitives et l'activité psychophysique.

La nature des bruits utilisés dans nos expériences peut également être discutée. En effet, le bruit brut et le bruit filtré en basses-fréquences ont été jugés comme étant les plus désagréables et les plus forts en termes d'intensité. Le signal brut était physiquement le plus intense allant de 1,15 à 3,54 dB(A) de plus que les autres. Cependant, les tonalités hautes-fréquences restantes dans le bruit filtré en basses-fréquences ont souvent été, si ce n'est pas plus, jugées négativement selon les termes d'évaluation subjective des bruits. Ce résultat suggère que la présence de tonalités hautes-fréquences est désagréable pour l'oreille humaine. Néanmoins, on ne peut pas exclure que les différences observées au niveau des conditions sonores puissent être dues aux différences d'intensité plutôt qu'à la présence des tonalités. C'est une limite qui peut être reprochée aux trois premières expériences pour lesquelles l'intensité sonore n'était pas la même pour chaque condition sonore. En effet, nous voulions recréer artificiellement l'effet d'un algorithme multi-tonalités à partir de signaux réels en filtrant les raies jusqu'à un niveau représentatif du contrôle actif. Or, l'effet d'un tel algorithme amène une diminution du niveau sonore globale pouvant aller jusqu'à 4 dB(A), permise grâce à la réduction d'amplitude des raies (Macchi, 2015). Malgré cela, des études ont montré que l'intensité sonore n'influçait pas les performances à des niveaux sonores n'excédant pas 95 dB(A) (Tremblay & Jones, 1999, 1999). De plus, dans notre étude complémentaire nous avons établi et contrôlé le niveau sonore des conditions bruyantes (bruit stationnaire

et fluctuant) à 80 dB(A) pour nous concentrer uniquement sur le caractère fluctuant du bruit et nous préserver d'un effet d'intensité.

Une autre limite de notre étude était l'âge moyen des participants (entre 18 et 35 ans). Nous nous sommes restreints à des personnes jeunes afin de contrôler un niveau d'audition sain (avec de faibles déficits auditifs) et hétérogène au sein de la population ainsi que pour obtenir un meilleur ratio signal sur bruit EEG. Cependant, l'amélioration du confort acoustique via l'utilisation de l'appui-tête à contrôle actif d'Airbus Helicopters cible le transport d'affaires et de personnalités (*VIP*). Nos échantillons n'étaient donc pas idéalement représentatifs de cette population. Ajouter un deuxième groupe de personnes plus âgées aurait permis de vérifier nos hypothèses sur cette population cible.

Pour finir nos résultats subjectifs ont été comparés à ceux obtenus par l'échelle de confort d'Airbus Helicopters et indiquent une bonne correspondance. Le bruit brut a été estimé comme étant le moins confortable, suivi du bruit filtré en basses-fréquences, du bruit filtré en hautes-fréquences et du filtre isophonique. Cet ordre correspondait également au classement de l'indice de confort. L'échelle de confort prend en compte la tonalité d'un bruit. Or, nos conditions mettaient justement en avant les composantes tonales de la boîte de transmission principale. Le classement obtenu par l'échelle de confort n'est donc pas surprenant au vu du nombre de tonalités présentes dans chacun des bruits. Le bruit brut était le bruit donc l'indice de tonalité était le plus haut, suivi du bruit filtré en basses fréquences dont l'indice d'acuité était le plus élevé. Le filtre isophonique avait pour objectif de fournir la même sensation d'intensité sonore à toutes les tonalités et globalement les résultats vont dans ce sens. Le bruit filtré sur toutes les tonalités était estimé comme étant celui le plus confortable de toutes nos conditions sonores, mais restait très proche du filtre isophonique.

5. CONCLUSION

Le contrôle actif se révèle être une solution complémentaire et efficace pour réduire le bruit en cabine d'hélicoptère. Cependant, pour optimiser les algorithmes de contrôle actif, il est nécessaire de définir quelles fréquences sont pertinentes à filtrer. Pour pouvoir juger de la pertinence d'une fréquence à filtrer, il est primordial de définir son impact sur un passager lorsqu'il réalise des activités. L'objectif de cette thèse était donc d'évaluer l'impact sur les passagers de différents filtres de bruit de cabine d'hélicoptère grâce à leur ressenti, leurs performances, des mesures psychophysiologiques (électroencéphalographie et électrocardiographie) et oculométriques plus objectives.

A l'exception d'un résultat modéré durant la tâche de vigilance, nos résultats ne montrent pas d'effet net de l'exposition courte à un bruit d'hélicoptère stationnaire et fluctuant sur les performances cognitives et les mesures psychophysiologiques. Cependant, le ressenti subjectif a été négativement impacté par les bruits ayant le plus de tonalités. De plus, un effet du temps a été observé sur les mesures psychophysiologiques se reflétant par une charge cognitive accrue au cours des expériences. Cet effet pourrait traduire un coût physiologique plus important en raison de stratégies d'adaptation au stress (*coping*) provoquées par le bruit. Ce résultat est appuyé par un rythme cardiaque plus élevé lors de l'exposition à des conditions bruyantes plutôt qu'en condition silencieuse.

Pour pouvoir confirmer que le bruit d'hélicoptère induit un coût plus important pour l'organisme (*coping*), des mesures du stress pourraient être utilisées. Ainsi des mesures du niveau de cortisol, une des hormones sécrétée en état de stress, pourrait être faites à différentes durées d'exposition au bruit d'hélicoptère. En effet, il a été montré que les humains exposés à un bruit de trafic aérien et routier présentaient une augmentation du taux de cortisol (Maschke et al., 1995). De plus, il a été montré que lorsque le bruit influençait une tâche exigeante mentalement, comme du calcul mental, le niveau de cortisol augmentait (Miki, Kawamorita, Araga, Musha, & Sudo, 1998 ; Tafalla & Evans, 1997). Une autre mesure objective de l'état de stress induit par le bruit pourrait être celle de la dilatation pupillaire. Il a été montré que le diamètre pupillaire était un bon indicateur du stress (Pedrotti et al., 2014). Cette mesure peut être enregistrée de manière déportée lors d'une tâche grâce à des oculomètres, cela permettrait d'apporter un confort plus important qu'avec l'utilisation de l'EEG et de l'ECG. La fatigue et la gêne ressentie au cours de l'exposition pourraient en être moins impactées.

Néanmoins, pour évaluer l'effet du bruit d'hélicoptère de manière plus réaliste et représentative d'un vol, une durée d'exposition plus longue (de minimum 1h) aurait été souhaitable. De cette manière, les différentes phases du vol pourraient être testées. Cependant nous étions contraints dans notre cas à des durées plus

courtes en raison du nombre important de conditions sonores que nous souhaitions tester.

Le ressenti subjectif associé à l'exposition d'un bruit peut avoir son importance, même si nous n'avons pas retrouvé un tel résultat (par exemple un impact du bruit sur les performances pour les sujets ayant ressenti un bruit comme plus désagréable). Une solution ne serait donc pas de simplement réduire le niveau sonore, mais de lui donner un profil sonore plus agréable, comme c'est le cas pour les voitures de luxe. Le traitement acoustique de ces véhicules a été particulièrement poussé ces dernières années. Un bruit plus grave sera associé, par exemple, à une puissance plus importante du moteur. Ainsi certaines gammes de fréquences sont plus appréciées par les consommateurs. La construction mécanique de la voiture peut alors être réalisée en fonction des fréquences à promouvoir tout en supprimant celles ressenties comme désagréables. De plus, la réduction n'est pas forcément une solution optimale parce qu'elle peut être coûteuse en termes de traitement. Par exemple on peut imaginer ajouter une source de bruit (comme un bruit rose) dans le but de masquer les tonalités émergentes et apporter des effets bénéfiques en termes de ressenti subjectif voire améliorer les performances cognitives (Landström et al., 1991).

Finalement, nos résultats suggèrent qu'un bruit filtré isophoniquement (en suivant la courbe de pondération A) donne des résultats relativement équivalents à un bruit filtré sur toutes les tonalités. On peut alors imaginer qu'un filtre isophonique appliqué à un algorithme de contrôle actif sera tout aussi efficace sur toutes les tonalités de la boîte de transmission principale qu'un algorithme multi-tonalités. De la sorte, le gain obtenu sur l'amplitude des tonalités pourrait permettre une économie de la puissance des haut-parleurs. Cette économie pourrait être mise à profit afin d'améliorer les champs d'action du contrôleur actif et élargir sa gamme de fréquence pour pouvoir filtrer davantage de raies. De plus, nos résultats suggèrent qu'un traitement acoustique spécifique n'est pas forcément nécessaire pour tenir compte de la tâche réalisée par les passagers, de leur personnalité ou de leur sensibilité au bruit.

Enfin, les essais ont été menés dans un environnement sans vibrations parasites alors que les passagers d'un d'hélicoptère sont également soumis à ce type de sollicitations. Il a été montré que les vibrations basses-fréquences représentaient une contribution majeure de l'inconfort ressenti en cabine d'hélicoptère (Delcor, Parizet, Caillet, & Ganivet-Ouzeneau, 2019). Il y a lieu de penser que la combinaison entre les perturbations vibratoires et acoustiques auront un impact plus grand sur le ressenti subjectif et le comportement relatif aux différentes tâches.

6. BIBLIOGRAPHIE

- Albarazin, A., Lucet, P., & Delinière, A. (2000). *Optimisation du système de contrôle actif de bruit sur hélicoptère*. CNRS/LMA-SACADS.
- Andrén, L. (1982). Cardiovascular effects of noise. *Acta Medica Scandinavica. Supplementum*, 657, 1-45.
- Antonenko, P., Paas, F. G. W. C., Grabner, R., & van Gog, T. (2010). Using Electroencephalography to Measure Cognitive Load. *Educational Psychology Review*, 22(4), 425-438. <https://doi.org/10.1007/s10648-010-9130-y>
- Arnsten, A. F. T., & Goldman-Rakic, P. S. (1998). Noise Stress Impairs Prefrontal Cortical Cognitive Function in Monkeys: Evidence for a Hyperdopaminergic Mechanism. *Archives of General Psychiatry*, 55(4), 362-368. <https://doi.org/10.1001/archpsyc.55.4.362>
- Atkinson, R. C., & Shiffrin, R. M. (1968). Human Memory: A Proposed System and its Control Processes. Dans K. W. Spence & J. T. Spence (Éds), *Psychology of Learning and Motivation* (Vol. 2, pp. 89 - 195). (S.I.): Academic Press. [https://doi.org/10.1016/S0079-7421\(08\)60422-3](https://doi.org/10.1016/S0079-7421(08)60422-3)
- Babamiri, M., Moatamedzadeh, M., Golmammadi, R., Derakhshan, J., & Farhadian, M. (2017). Role of Personality Type in the Effects of Low Frequency Sound on Cognitive Performance of the Students. *Journal of Occupational Hygiene Engineering*, 4(2), 59-66. <https://doi.org/10.18869/acadpub.johe.4.2.59>
- Babisch, W. (2002). The noise/stress concept, risk assessment and research needs. *Noise and Health*, 4(16), 1.
- Babisch, W. (2003). Stress hormones in the research on cardiovascular effects of noise. *Noise and Health*, 5(18), 1.
- Barjavel, R. (1968). *La Nuit des temps*. (S.I.): Presses de la Cité. (Google-Books-ID: ohA8BQAAQBAJ).
- Barry, R. J., Clarke, A. R., Johnstone, S. J., Magee, C. A., & Rushby, J. A. (2007). EEG differences between eyes-closed and eyes-open resting conditions. *Clinical Neurophysiology*, 118(12), 2765 - 2773. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2007.07.028>
- Başar-Eroglu, C., Başar, E., Demiralp, T., & Schürmann, M. (1992). P300-response: possible psychophysiological correlates in delta and theta frequency channels. A review. *International Journal of Psychophysiology*, 13(2), 161-179. [https://doi.org/10.1016/0167-8760\(92\)90055-G](https://doi.org/10.1016/0167-8760(92)90055-G)
- Bastin, L., & Deroux, C. (2007). Chapitre 4: Évaluation des capacités attentionnelles chez l'enfant. Dans *Bilan neuropsychologique de l'enfant*. (S.I.): Mardaga. Repéré à https://www.cairn.info/bilan-neuropsychologique-de-l-enfant--9782870099643-page-97.htm?try_download=1
- Bayssie, L., Bonnet, P., Le Blaye, P., & Chaudron, L. (2004). Cognitive Performance Evaluation With Δ Method At Lips. *Contemporary Ergonomics 2004*, 455.

- Bebesel, M., Maier, R., & Hoffmann, F. (2001). Reduction of interior noise in helicopters by using active gearbox struts - Results of flight tests. Dans *27th European Rotorcraft Forum* (pp. 1-8). Moscow, Russia.
- Belojević, G., & Jakovljevic, B. (2003). Noise and mental performance: Personality attributes and noise sensitivity. *Noise and Health, 6*(21), 77.
- Belojević, G., Jakovljevic, B., Stojanov, V., Paunovic, K., & Ilic, J. (2008). Urban road-traffic noise and blood pressure and heart rate in preschool children. *Environment International, 34*(2), 226 - 231. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2007.08.003>
- Belojević, G., Öhrström, E., & Rylander, R. (1992). Effects of noise on mental performance with regard to subjective noise sensitivity. *International Archives of Occupational and Environmental Health, 64*(4), 293 - 301. <https://doi.org/10.1007/BF00378288>
- Belojević, G., Slepcevic, V., & Jakovljevic, B. (2001). Mental Performance in Noise: The Role of Introversion. *Journal of Environmental Psychology, 21*(2), 209-213. <https://doi.org/10.1006/jevp.2000.0188>
- Benfield, J. A., Nurse, G. A., Jakubowski, R., Gibson, A. W., B. D. Taff, P. Newman, & Bell, P. A. (2014). Testing Noise in the Field: A Brief Measure of Individual Noise Sensitivity. *Environment and Behavior, 46*(3), 353-372. <https://doi.org/10.1177/0013916512454430>
- Berger, H. (1929). Über das Elektrenkephalogramm des Menschen. *Archiv für Psychiatrie und Nervenkrankheiten, 87*(1), 527 - 570. <https://doi.org/10.1007/BF01797193>
- Bertrand, O., Perrin, F., & Pernier, J. (1985). A theoretical justification of the average reference in topographic evoked potential studies. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology/Evoked Potentials Section, 62*(6), 462 - 464. [https://doi.org/10.1016/0168-5597\(85\)90058-9](https://doi.org/10.1016/0168-5597(85)90058-9)
- Bidet-Caulet, A., Mikyska, C., & Knight, R. T. (2010). Load effects in auditory selective attention: Evidence for distinct facilitation and inhibition mechanisms. *NeuroImage, 50*(1), 277. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2009.12.039>
- Bigdely-Shamlo, N., Mullen, T., Kothe, C., Su, K.-M., & Robbins, K. A. (2015). The PREP pipeline: standardized preprocessing for large-scale EEG analysis. *Frontiers in Neuroinformatics, 9*. <https://doi.org/10.3389/fninf.2015.00016>
- Blankenship, A. B. (1938). Memory span: a review of the literature. *Psychological Bulletin, 35*(1), 1-25. <https://doi.org/10.1037/h0061086>
- Bliss, J. (1993). The cry-wolf phenomenon and its effect on alarm responses. *Retrospective Theses and Dissertations*. Repéré à <https://stars.library.ucf.edu/rtd/3614>
- Boksem, M. A. S., Meijman, T. F., & Lorist, M. M. (2005). Effects of mental fatigue on attention: An ERP study. *Cognitive Brain Research, 25*(1), 107 - 116. <https://doi.org/10.1016/j.cogbrainres.2005.04.011>

- Bopp, K. L., & Verhaeghen, P. (2005). Aging and Verbal Memory Span: A Meta-Analysis. *The Journals of Gerontology: Series B*, 60(5), P223 - P233. <https://doi.org/10.1093/geronb/60.5.P223>
- Boucher, C. C., Elliott, S. J., & Baek, K. H. (1996). Active control of helicopter rotor tones. Dans *INTERNOISE 96* (pp. 1179-1182). Liverpool.
- Boutcher, Y. N., & Boutcher, S. H. (2006). Cardiovascular response to Stroop: Effect of verbal response and task difficulty. *Biological Psychology*, 73(3), 235-241. <https://doi.org/10.1016/j.biopsycho.2006.04.005>
- Bouvard, M., Aulard-Jaccod, J., Pessonneaux, S., Hautekeete, M., & Rogé, B. (2010). Étude du questionnaire de personnalité d'Eysenck révisé et abrégé (EPQR-A) dans une population d'étudiants. *L'Encéphale*, 36(6), 510 - 512. <https://doi.org/10.1016/j.encep.2010.02.006>
- Bowden, E. E. (2006). Investigations of indoor noise criteria systems based on human perception and task performance. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 120(4), 1754-1754. <https://doi.org/10.1121/1.2353800>
- Bowden, E. E., & Wang, L. M. (2004). Relating human productivity and annoyance to indoor noise criteria systems. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 115(5), 2370-2370. <https://doi.org/10.1121/1.4779958>
- Broadbent, D. E. (1953). Noise, paced performance and vigilance tasks. *British Journal of Psychology*, 44, 295-303.
- Broadbent, D. E. (1958). *Perception and Communication*. (S.I.) : Elsevier. (Google-Books-ID: ZCOLBQAAQBAJ).
- Broadbent, D. E. (1971). *Decision and stress* (Vol. xiv). Oxford, England : Academic Press.
- Broadbent, D. E. (1978). The current state of noise research: Reply to Poulton. *Psychological Bulletin*, 85(5), 1052 - 1067. <https://doi.org/10.1037/0033-2909.85.5.1052>
- Broadbent, D. E. (1979). Human performance and noise. *Handbook of noise control*, 2, 1-20.
- Brosschot, J. F., & Thayer, J. F. (2003). Heart rate response is longer after negative emotions than after positive emotions. *International Journal of Psychophysiology*, 50(3), 181 - 187. [https://doi.org/10.1016/S0167-8760\(03\)00146-6](https://doi.org/10.1016/S0167-8760(03)00146-6)
- Brouwer, A.-M., Hogervorst, M. A., Erp, J. B. F. van, Heffelaar, T., Zimmerman, P. H., & Robert Oostenveld. (2012). Estimating workload using EEG spectral power and ERPs in the n-back task. *Journal of Neural Engineering*, 9(4), 045008. <https://doi.org/10.1088/1741-2560/9/4/045008>
- Brown, T. G., Szabo, A., & Seraganian, P. (1988). Physical Versus Psychological Determinants of Heart Rate Reactivity to Mental Arithmetic. *Psychophysiology*, 25(5), 532 - 537. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8986.1988.tb01888.x>

- Budday, S., Raybaud, C., & Kuhl, E. (2014). A mechanical model predicts morphological abnormalities in the developing human brain. *Scientific Reports*, 4, 5644. <https://doi.org/10.1038/srep05644>
- Cariou, C., & Martin, V. (1996). *Stratégie de contrôle actif de bruit harmonique moyenne fréquence dans un habitacle*. CNRS/LMR.
- Carlo, G., Okun, M. A., Knight, G. P., & de Guzman, M. R. T. (2005). The interplay of traits and motives on volunteering: agreeableness, extraversion and prosocial value motivation. *Personality and Individual Differences*, 38(6), 1293-1305. <https://doi.org/10.1016/j.paid.2004.08.012>
- Casali, J. G., & Robinson, G. S. (1999). Noise in industry: Auditory effects, measurement, regulations, and management. *The Occupational Ergonomics Handbook, 2nd ed.*; Marras, WKW, Ed, 1661-1692.
- Cattell, R. B. (1965). *The scientific analysis of personality*. Oxford, England : Penguin Books.
- Cauchard, F., Cane, J. E., & Weger, U. W. (2012). Influence of Background Speech and Music in Interrupted Reading: An Eye-Tracking Study. *Applied Cognitive Psychology*, 26(3), 381-390. <https://doi.org/10.1002/acp.1837>
- Causse, M., Chua, Z., Peysakhovich, V., Campo, N. D., & Matton, N. (2017). Mental workload and neural efficiency quantified in the prefrontal cortex using fNIRS. *Scientific Reports*, 7(1), 1 - 15. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-05378-x>
- Causse, M., Peysakhovich, V., & Mandrick, K. (2017). Eliciting Sustained Mental Effort Using the Toulouse N-Back Task: Prefrontal Cortex and Pupillary Responses. Dans *Advances in Neuroergonomics and Cognitive Engineering* (pp. 185-193). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-41691-5_16
- Causse, M., Sénard, J.-M., Démonet, J. F., & Pastor, J. (2010). Monitoring Cognitive and Emotional Processes Through Pupil and Cardiac Response During Dynamic Versus Logical Task. *Applied Psychophysiology and Biofeedback*, 35(2), 115-123. <https://doi.org/10.1007/s10484-009-9115-0>
- Chajut, E., & Algom, D. (2003). Selective attention improves under stress: Implications for theories of social cognition. *Journal of Personality and Social Psychology*, 85(2), 231-248. <https://doi.org/10.1037/0022-3514.85.2.231>
- Chen, Y., Ghinet, S., Price, A., Wickramasinghe, V., & Grewal, A. (2017). Investigation of aircrew noise exposure levels and hearing protection solutions in helicopter cabin. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 28(8), 1050-1058. <https://doi.org/10.1177/1045389X16667553>
- Chitwood, M. R., & Vaughn, K. E. (2018). Cognitive Performance and Sounds: The Effects of Lyrical Music and Pink Noise on Performance. *Nýsa, The NKU Journal of Student Research*, 1(2018), 9-14.
- Clevenson, S. A., Leatherwood, J. D., & Hollenbaugh, D. D. (1983). Operational military helicopter interior noise and vibration measurements with

- comparisons to ride quality criteria. Dans *AIAA 83* (Vol. 2526). Fort Worth, Texas. <https://doi.org/10.2514/6.1983-2526>
- Clifford, G. D. (2002). *Signal processing methods for heart rate variability*. <http://purl.org/dc/dcmitype/Text>. Oxford University, UK. Repéré à <https://ora.ox.ac.uk/objects/uuid:5129701f-1d40-425a-99a3-59a05e8c1b23>
- Cohen, M. X. (2014). *Analyzing Neural Time Series Data: Theory and Practice*. (S.l.) : MIT Press. (Google-Books-ID: rDKkAgAAQBAJ).
- Cohen, S., & Spacapan, S. (1984). The social psychology of noise. Dans *Noise and Society* (pp. 221-245). (S.l.) : Jones D. M. & Chapman A. J.
- Colle, H. A., & Welsh, A. (1976). Acoustic masking in primary memory. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, 15(1), 17 - 31. [https://doi.org/10.1016/S0022-5371\(76\)90003-7](https://doi.org/10.1016/S0022-5371(76)90003-7)
- Corcoran, D. W. J. (1962). Noise and loss of sleep. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 14(3), 178-182. <https://doi.org/10.1080/17470216208416533>
- Cosa, M., & Cosa, G. (1989). Annoyance, disturbance and damage caused by noise and vibrations. *Annali di igiene: medicina preventiva e di comunita*, 1(1-2), 133-156.
- Costa, P. T., & McCrae, R. R. (1985). The NEO personality inventory.
- Costa, S. D., Zwaag, W. van der, Marques, J. P., Frackowiak, R. S. J., Clarke, S., & Saenz, M. (2011). Human Primary Auditory Cortex Follows the Shape of Heschl's Gyrus. *Journal of Neuroscience*, 31(40), 14067 - 14075. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.2000-11.2011>
- Coy, J. J., Handschuh, R. F., Lewicki, D. G., Huff, R. G., Krejsa, E. A., & Karchmer, A. M. (1987). Identification and proposed control of helicopter transmission noise at the source. Dans *AIRCRAFT DESIGN, TESTING AND PERFORMANCE* (Vol. NASA-TM-89312, NAS 1.15:89312, USAAVCOM-TR-87-C-2, AD-A219535). Cleveland, OH, United States. Repéré à <https://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=19870007383>
- Crannell, C. W., & Parrish, J. M. (1957). A Comparison of Immediate Memory Span for Digits, Letters, and Words. *The Journal of Psychology*, 44(2), 319 - 327. <https://doi.org/10.1080/00223980.1957.9713089>
- Dancer, A. (1991). Le traumatisme acoustique. *médecine/sciences*, 7(4), 357-367.
- Dehais, F., Causse, M., Vachon, F., Régis, N., Menant, E., & Tremblay, S. (2014). Failure to detect critical auditory alerts in the cockpit: evidence for inattentive deafness. *Human Factors*, 56(4), 631 - 644. <https://doi.org/10.1177/0018720813510735>
- DeJoy, D. M. (1984). The nonauditory effects of noise: Review and perspectives for research. *Journal of Auditory Research*, 24(2), 123-150.
- Delcor, L., Parizet, E., Caillet, J., & Ganivet-Ouzeneau, J. (2019). Perceived discomfort for tri-axial helicopters vibrations. Dans *Proceedings of the 23rd International Congress on Acoustics*.

- Delorme, A., & Makeig, S. (2004). EEGLAB: an open source toolbox for analysis of single-trial EEG dynamics including independent component analysis. *Journal of Neuroscience Methods*, *134*(1), 9–21. <https://doi.org/10.1121/1.4929899>
- Di, G.-Q., Fan, M.-C., & Lin, Q.-H. (2018). An experimental study on EEG characteristics induced by intermittent pure tone stimuli at different frequencies. *Applied Acoustics*, *141*, 46 - 53. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2018.06.024>
- Dobbs, S., Furnham, A., & McClelland, A. (2011). The effect of background music and noise on the cognitive test performance of introverts and extraverts. *Applied Cognitive Psychology*, *25*(2), 307-313. <https://doi.org/10.1002/acp.1692>
- Dudai, Y. (2004a). *Memory from A to Z: Keywords, Concepts, and Beyond*. (S.I.) : Oxford University Press. (Google-Books-ID: 42N7DwAAQBAJ).
- Dudai, Y. (2004b). The neurobiology of consolidations, or, how stable is the engram? *Annual Review of Psychology*, *55*, 51 - 86. <https://doi.org/10.1146/annurev.psych.55.090902.142050>
- Dussac, M., & Cremesi, A. (2001a). *Contrôle actif de bruit en cabine par haut-parleurs - bilan des performances au point fixe dans l'AEC154* (Rapport No. TNX000AR427F01). Eurocopter.
- Dussac, M., & Cremesi, A. (2001b). *Contrôle actif de bruit en cabine par haut-parleurs - Synthèse des essais réalisés dans la maquette cabine N4* (Rapport No. TNX000AR403F01). Eurocopter.
- Dussac, M., & Ducros, E. (1998). *Contrôle actif du bruit d'engrènement - Bilan des essais sur Dauphin 6001 et proposition de logique de développement* (Rapport No. TNX000AR431F98). Eurocopter.
- Dussac, M., Dupont, M., & Djelassi, M. (1998). *Contrôle actif du bruit d'engrènement par haut-parleur - Bilan des essais en vol sur Dauphin N4* (Rapport No. TNX460AA009F99). Eurocopter.
- Edmonds, E. M., & Smith, L. R. (1985). Students' Performance as a Function of Sex, Noise, and Intelligence. *Psychological Reports*, *56*(3), 727 - 730. <https://doi.org/10.2466/pr0.1985.56.3.727>
- Elliott, S. (2000). *Signal Processing for Active Control*. (S.I.) : Academic Press. (Google-Books-ID: GkIDOTI6ZLIC).
- Eschenbrenner, A. J. (1971). Effects of Intermittent Noise on the Performance of a Complex Psychomotor Task. *Human Factors*, *13*(1), 59 - 63. <https://doi.org/10.1177/001872087101300108>
- Eurocopter. (2010). *Brevet n° FR_2939406_A1*.
- Evans, G. W., Hygge, S., & Bullinger, M. (1995). Chronic Noise and Psychological Stress. *Psychological Science*, *6*(6), 333-338. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9280.1995.tb00522.x>
- Evans, G. W., & Lepore, S. J. (1993). Nonauditory Effects of Noise on Children: A Critical Review. *Children's Environments*, *10*(1), 31-51.

- Eysenck, H. J. (1968). Manual for the Eysenck personality inventory, Education and industrial testing service. *San Diego: University of California*.
- Eysenck, H. J. (1979). Personality Factors in a Random Sample of the Population. *Psychological Reports*, 44(3_suppl), 1023 - 1027. <https://doi.org/10.2466/pr0.1979.44.3c.1023>
- Eysenck, M. W. (1982). Theories of Arousal and Performance. Dans M. W. Eysenck (Éd.), *Attention and Arousal: Cognition and Performance* (pp. 47-66). Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-68390-9_4
- Eysenck, M. W., & Graydon, J. (1989). Susceptibility to distraction as a function of personality. *Personality and Individual Differences*, 10(6), 681 - 687. [https://doi.org/10.1016/0191-8869\(89\)90227-4](https://doi.org/10.1016/0191-8869(89)90227-4)
- Eysenck, S. B. G., Eysenck, H. J., & Barrett, P. (1985). A revised version of the psychoticism scale. *Personality and Individual Differences*, 6(1), 21 - 29. [https://doi.org/10.1016/0191-8869\(85\)90026-1](https://doi.org/10.1016/0191-8869(85)90026-1)
- Faber, L. G., Maurits, N. M., & Lorist, M. M. (2012). Mental Fatigue Affects Visual Selective Attention. *PLOS ONE*, 7(10), e48073. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0048073>
- Fairclough, S. H., & Venables, L. (2004). Effects of Task Demand and Time-on-Task on Psychophysiological Candidates for Biocybernetic Control. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 48(1), 85 - 89. <https://doi.org/10.1177/154193120404800119>
- Fink, A., Grabner, R. H., Neuper, C., & Neubauer, A. C. (2005). EEG alpha band dissociation with increasing task demands. *Cognitive Brain Research*, 24(2), 252-259. <https://doi.org/10.1016/j.cogbrainres.2005.02.002>
- Finkelman, J. M., Zeitlin, L. R., Romoff, R. A., Friend, M. A., & Brown, L. S. (1979). Conjoint Effect of Physical Stress and Noise Stress on Information Processing Performance and Cardiac Response. *Human Factors*, 21(1), 1 - 6. <https://doi.org/10.1177/001872087902100101>
- Fletcher, H., & Munson, W. A. (1933). Loudness, Its Definition, Measurement and Calculation*. *Bell System Technical Journal*, 12(4), 377 - 430. <https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1933.tb00403.x>
- Folk, C. L., & Remington, R. (1998). Selectivity in distraction by irrelevant featural singletons: Evidence for two forms of attentional capture. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 24(3), 847-858. <https://doi.org/10.1037/0096-1523.24.3.847>
- Francis, L. J., Brown, L. B., & Philipchalk, R. (1992). The development of an abbreviated form of the revised Eysenck personality questionnaire (EPQR-A): Its use among students in England, Canada, the U.S.A. and Australia. *Personality and Individual Differences*, 13(4), 443 - 449. [https://doi.org/10.1016/0191-8869\(92\)90073-X](https://doi.org/10.1016/0191-8869(92)90073-X)
- Furnham, A., & Bradley, A. (1997). Music While You Work: The Differential Distraction of Background Music on the Cognitive Test Performance of

- Introverts and Extraverts. *Appl . Cognit . Psychol*, 11(December 2015), 445–455. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-0720\(199710\)11:5<445::AID-ACP472>3.0.CO;2-R](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-0720(199710)11:5<445::AID-ACP472>3.0.CO;2-R)
- Furnham, A., & Strbac, L. (2002). Music is as distracting as noise: the differential distraction of background music and noise on the cognitive test performance of introverts and extraverts. *Ergonomics*, 45(3), 203 - 217. <https://doi.org/10.1080/00140130210121932>
- Gaillard, A. W. (2008). Concentration, stress and performance. Dans *Performance under stress* (Hancock, P. A., Szalma, J. L., pp. 59-75). Aldershot, England : Ashgate Publishing, Ltd.
- Gale, A., Davies, R., & Smallbone, A. (1977). EEG Correlates of Signal Rate, Time in Task and Individual Differences in Reaction Time During a Five-stage Sustained Attention Task. *Ergonomics*, 20(4), 363 - 376. <https://doi.org/10.1080/00140137708931639>
- Gevins, A., & Smith, M. E. (2000). Neurophysiological Measures of Working Memory and Individual Differences in Cognitive Ability and Cognitive Style. *Cerebral Cortex*, 10(9), 829-839. <https://doi.org/10.1093/cercor/10.9.829>
- Gevins, A., & Smith, M. E. (2003). Neurophysiological measures of cognitive workload during human-computer interaction. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 4(1-2), 113-131. <https://doi.org/10.1080/14639220210159717>
- Gevins, A., & Smith, M. E. (2006). Electroencephalography (EEG) in Neuroergonomics. Dans *Neuroergonomics: The brain at work* (pp. 15-31). New York : Oxford University Press, USA.
- Gevins, A., Smith, M. E., Leong, H., McEvoy, L., Whitfield, S., Du, R., & Rush, G. (1998). Monitoring Working Memory Load during Computer-Based Tasks with EEG Pattern Recognition Methods. *Human Factors*, 40(1), 79 - 91. <https://doi.org/10.1518/001872098779480578>
- Giraudet, L., St-Louis, M.-E., Scannella, S., & Causse, M. (2015). P300 Event-Related Potential as an Indicator of Inattentive Deafness? *PLOS ONE*, 10(2), e0118556. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0118556>
- Goldberger, A. L., Goldberger, Z. D., & Shvilkin, A. (2017). *Clinical Electrocardiography: A Simplified Approach*. (S.l.) : Elsevier Health Sciences. (Google-Books-ID: q59tDgAAQBAJ).
- Gomarus, H. K., Althaus, M., Wijers, A. A., & Minderaa, R. B. (2006). The effects of memory load and stimulus relevance on the EEG during a visual selective memory search task: An ERP and ERD/ERS study. *Clinical Neurophysiology*, 117(4), 871-884. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2005.12.008>
- Grimaldi, J. V. (1958). Sensori-Motor Performance Under Varying Noise Conditions. *Ergonomics*, 2(1), 34-43. <https://doi.org/10.1080/00140135808930400>
- Gulian, E., & Thomas, J. R. (1986). The effects of noise, cognitive set and gender on mental arithmetic performance. *British Journal of Psychology*, 77(4), 503-511. <https://doi.org/10.1111/j.2044-8295.1986.tb02214.x>

- Guthrie, J. T., Wigfield, A., Metsala, J. L., & Cox, K. E. (1999). Motivational and Cognitive Predictors of Text Comprehension and Reading Amount. *Scientific Studies of Reading*, 3(3), 231 - 256. https://doi.org/10.1207/s1532799xssr0303_3
- Haines, M. M., Stansfeld, S. A., Job, R. F., Berglund, B., & Head, J. (2001). Chronic aircraft noise exposure, stress responses, mental health and cognitive performance in school children. *Psychol Med*, 31(2), 265-277.
- Haist, F., Gore, J. B., & Mao, H. (2001). Consolidation of human memory over decades revealed by functional magnetic resonance imaging. *Nature Neuroscience*, 4(11), 1139-1145. <https://doi.org/10.1038/nn739>
- Hambrick-Dixon, P. J. (1988). The effect of elevated subway train noise over time on black children's visual vigilance performance. *Journal of Environmental Psychology*, 8(4), 299-314. [https://doi.org/10.1016/S0272-4944\(88\)80036-7](https://doi.org/10.1016/S0272-4944(88)80036-7)
- Hamer, M., Boutcher, Y. N., & Boutcher, S. H. (2003). The role of cardiopulmonary baroreceptors during the forearm vasodilatation response to mental stress. *Psychophysiology*, 40(2), 249-253. <https://doi.org/10.1111/1469-8986.00026>
- Hancock, P. A. (1989). A Dynamic Model of Stress and Sustained Attention. *Human Factors*, 31(5), 519-537. <https://doi.org/10.1177/001872088903100503>
- Hansen, A. L., Johnsen, B. H., & Thayer, J. F. (2003). Vagal influence on working memory and attention. *International Journal of Psychophysiology*, 48(3), 263-274. [https://doi.org/10.1016/S0167-8760\(03\)00073-4](https://doi.org/10.1016/S0167-8760(03)00073-4)
- Hasher, L., & Zacks, R. T. (1988). Working Memory, Comprehension, and Aging: A Review and a New View. *Psychology of Learning and Motivation*, 22, 193-225. [https://doi.org/10.1016/S0079-7421\(08\)60041-9](https://doi.org/10.1016/S0079-7421(08)60041-9)
- Hatton, H. M., Berg, W. K., & Graham, F. K. (1970). Effects of acoustic rise time on heart rate response. *Psychonomic Science*, 19(2), 101 - 103. <https://doi.org/10.3758/BF03337442>
- Hebb, D. O. (1955). Drives and the C. N. S. (conceptual nervous system). *Psychological Review*, 62(4), 243-254. <https://doi.org/10.1037/h0041823>
- Hellman, R. P. (1982). Loudness, annoyance, and noisiness produced by single-tone-noise complexes. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 72(1), 62-73. <https://doi.org/10.1121/1.388025>
- Hellman, R. P. (1985). Perceived magnitude of two-tone-noise complexes: Loudness, annoyance, and noisiness. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 77(4), 1497-1504. <https://doi.org/10.1121/1.392044>
- Helton, W. S. (2004). Validation of a Short Stress State Questionnaire. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 48(11), 1238-1242. <https://doi.org/10.1177/154193120404801107>
- Hendelman, W. J. (2013). *Atlas de neuroanatomie fonctionnelle: Première édition française*. (S.l.): University of Ottawa Press. (Google-Books-ID: j51jAwAAQBAJ).

- Hidalgo-Muñoz, A. R., Mouratille, D., Matton, N., Causse, M., Rouillard, Y., & El-Yagoubi, R. (2018). Cardiovascular correlates of emotional state, cognitive workload and time-on-task effect during a realistic flight simulation. *International Journal of Psychophysiology*, *128*, 62 - 69. <https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2018.04.002>
- Hijzen, T. H., Van Der Gugten, J., & Bouter, L. (1984). Active and passive coping under different degrees of stress; Effects on urinary and plasma catecholamines and ECG T-wave. *Biological Psychology*, *18*(1), 23 - 32. [https://doi.org/10.1016/0301-0511\(84\)90023-1](https://doi.org/10.1016/0301-0511(84)90023-1)
- Hockey, G. R. J. (1970). Effect of Loud Noise on Attentional Selectivity. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *22*(1), 28 - 36. <https://doi.org/10.1080/14640747008401898>
- Hockey, G. R. J. (1986). Changes in operator efficiency as a function of environmental stress, fatigue, and circadian rhythms. Dans K. R. Boff, L. Kaufman, & J. P. Thomas (Éds), *Handbook of perception and human performance, Vol. 2: Cognitive processes and performance* (pp. 1-49). Oxford, England : John Wiley & Sons.
- Holm, A., Lukander, K., Korpela, J., Sallinen, M., & Müller, K. M. I. (2009). Estimating Brain Load from the EEG. *The Scientific World Journal*, *9*, 639 - 651. <http://dx.doi.org/10.1100/tsw.2009.83>
- Holt, R. R. (1993). Occupational stress. Dans *Handbook of stress: Theoretical and clinical aspects, 2nd ed* (pp. 342-367). New York, NY, US : Free Press.
- Howard, D. M., & Angus, J. (2017). *Acoustics and Psychoacoustics* (5^e éd.). New York; London : Routledge.
- Huang, Q., & Tang, J. (2010). Age-related hearing loss or presbycusis. *European Archives of Oto-Rhino-Laryngology*, *267*(8), 1179 - 1191. <https://doi.org/10.1007/s00405-010-1270-7>
- Humphreys, M. S., & Revelle, W. (1984). Personality, motivation, and performance: A theory of the relationship between individual differences and information processing. *Psychological Review*, *91*(2), 153 - 184. <https://doi.org/10.1037/0033-295X.91.2.153>
- Humpstone, H. J. (1919). Memory Span Tests. *The Psychological Clinic*, *12*(5-9), 196-200.
- Hygge, S., Boman, E., & Enmarker, I. (2003). The effects of road traffic noise and meaningful irrelevant speech on different memory systems. *Scandinavian Journal of Psychology*, *44*(1), 13-21. <https://doi.org/10.1111/1467-9450.00316>
- Hygge, S., Evans, G. W., & Bullinger, M. (2002). A Prospective Study of Some Effects of Aircraft Noise on Cognitive Performance in Schoolchildren. *Psychological Science*, *13*(5), 469-474. <https://doi.org/10.1111/1467-9280.00483>
- Hygge, S., & Knez, I. (2001). Effects of Noise, Heat and Indoor Lighting on Cognitive Performance and Self-Reported Affect. *Journal of Environmental Psychology*, *21*(3), 291-299. <https://doi.org/10.1006/jevps.2001.0222>

- Iachini, T., Maffei, L., Ruotolo, F., Senese, V. P., Ruggiero, G., Masullo, M., & Alekseeva, N. (2012). Multisensory Assessment of Acoustic Comfort Aboard Metros: a Virtual Reality Study. *Applied Cognitive Psychology*, 26(5), 757-767. <https://doi.org/10.1002/acp.2856>
- Ishii, A., Tanaka, M., Iwamae, M., Kim, C., Yamano, E., & Watanabe, Y. (2013). Fatigue sensation induced by the sounds associated with mental fatigue and its related neural activities: revealed by magnetoencephalography. *Behavioral and Brain Functions: BBF*, 9, 24. <https://doi.org/10.1186/1744-9081-9-24>
- Jackson, A. F., & Bolger, D. J. (2014, 1 novembre). The neurophysiological bases of EEG and EEG measurement: A review for the rest of us. *Psychophysiology*. <https://doi.org/10.1111/psyp.12283>
- James, W., Burkhardt, F., Bowers, F., & Skrupskelis, I. K. (1890). *The principles of psychology* (Vol. 1). (S.l.) : Macmillan London.
- Jelínková, Z., Pícek, M., & Hyncica, V. (1988). Psychophysiological factors determining responses to noise load. *Activitas Nervosa Superior*, 30(2), 146-147.
- Jensen, O., Gelfand, J., Kounios, J., & Lisman, J. E. (2002). Oscillations in the Alpha Band (9–12 Hz) Increase with Memory Load during Retention in a Short-term Memory Task. *Cerebral Cortex*, 12(8), 877 - 882. <https://doi.org/10.1093/cercor/12.8.877>
- Jensen, O., & Tesche, C. D. (2002). Frontal theta activity in humans increases with memory load in a working memory task. *European Journal of Neuroscience*, 15(8), 1395-1399. <https://doi.org/10.1046/j.1460-9568.2002.01975.x>
- Jerison, H. J. (1957). Performance on a Simple Vigilance Task in Noise and Quiet. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 29(11), 1163 - 1165. <https://doi.org/10.1121/1.1908729>
- Jerison, H. J. (1959). Effects of noise on human performance. *Journal of Applied Psychology*, 43(2), 96-101. <https://doi.org/10.1037/h0042914>
- Jones, D. (1990). Recent advances in the study of human performance in noise. *Environment International*, 16(4), 447 - 458. [https://doi.org/10.1016/0160-4120\(90\)90013-V](https://doi.org/10.1016/0160-4120(90)90013-V)
- Jones, D. (1993). Objects, streams, and threads of auditory attention. Dans A. D. Baddeley & L. Weiskrantz (Éds), *Attention: Selection, awareness, and control: A tribute to Donald Broadbent* (pp. 87-104). New York, NY, US : Clarendon Press/Oxford University Press.
- Joseph, P., Elliott, S. J., & Nelson, P. A. (1994). Statistical Aspects of Active Control in Harmonic Enclosed Sound Fields. *Journal of Sound and Vibration*, 172(5), 629 - 655. <https://doi.org/10.1006/jsvi.1994.1203>
- Jung, C. G. (1939). *The integration of the personality*. Oxford, England : Farrar & Rinehart.
- Junghöfer, M., Elbert, T., Tucker, D. M., & Braun, C. (1999). The polar average reference effect: a bias in estimating the head surface integral in EEG

- recording. *Clinical Neurophysiology*, 110(6), 1149 - 1155. [https://doi.org/10.1016/S1388-2457\(99\)00044-9](https://doi.org/10.1016/S1388-2457(99)00044-9)
- Kahneman, D. (1973). *Attention and effort*. Englewood Cliffs : Prentice Hall.
- Kamzanova, A. T., Kustubayeva, A. M., & Matthews, G. (2014). Use of EEG Workload Indices for Diagnostic Monitoring of Vigilance Decrement. *Human Factors*, 56(6), 1136-1149. <https://doi.org/10.1177/0018720814526617>
- Kane, M. J., Conway, A. R. A., Miura, T. K., & Colflesh, G. J. H. (2007). Working Memory, Attention Control, and the N-Back Task: A Question of Construct Validity. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 33(3), 615-622. <https://doi.org/10.1037/0278-7393.33.3.615>
- Kasprzak, C. (2012). Influence of Infrasound on the Alpha Rhythm of EEG Signal. *Acta Physica Polonica A*, 1A(121), A-61-A-64. <https://doi.org/10.12693/APhysPolA.121.A-61>
- Keller, M. (2008). *Contrôle actif du bruit basses fréquences à l'intérieur d'un hélicoptère*. Acoustique. Université de Provence - Aix-Marseille. Repéré à <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00408406>
- Kirchner, W. K. (1958). Age differences in short-term retention of rapidly changing information. *Journal of Experimental Psychology*, 55(4), 352 - 358. <https://doi.org/10.1037/h0043688>
- Kirk, R. E., & Hecht, E. (1963). Maintenance of Vigilance by Programmed Noise. *Perceptual and Motor Skills*, 16(2), 553 - 560. <https://doi.org/10.2466/pms.1963.16.2.553>
- Klare, G. R. (1968). The Role of Word Frequency in Readability. *Elementary English*, 45(1), 12-22.
- Klimesch, W. (1999). EEG alpha and theta oscillations reflect cognitive and memory performance: a review and analysis. *Brain Research Reviews*, 29(2), 169-195. [https://doi.org/10.1016/S0165-0173\(98\)00056-3](https://doi.org/10.1016/S0165-0173(98)00056-3)
- Klimesch, W. (2012). Alpha-band oscillations, attention, and controlled access to stored information. *Trends in Cognitive Sciences*, 16(12), 606 - 617. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2012.10.007>
- Kou, S., McClelland, A., & Furnham, A. (2018). The effect of background music and noise on the cognitive test performance of Chinese introverts and extraverts. *Psychology of Music*, 46(1), 125 - 135. <https://doi.org/10.1177/0305735617704300>
- Kristiansen, J., Lund, S. P., Persson, R., Shibuya, H., Nielsen, P. M., & Scholz, M. (2014). A study of classroom acoustics and school teachers' noise exposure, voice load and speaking time during teaching, and the effects on vocal and mental fatigue development. *International Archives of Occupational and Environmental Health*, 87(8), 851-860. <https://doi.org/10.1007/s00420-014-0927-8>
- Kryter, K. D. (1985). The effects of noise on man. *Environmental Science Series*. New York: Academic Press I, 970.

- Kryter, K. D., & Pearsons, K. S. (1965). Judged Noisiness of a Band of Random Noise Containing an Audible Pure Tone. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 38(1), 106-112. <https://doi.org/10.1121/1.1909578>
- Lal, S. K. L., & Craig, A. (2002). Driver fatigue: Electroencephalography and psychological assessment. *Psychophysiology*, 39(3), 313 - 321. <https://doi.org/10.1017/S0048577201393095>
- Lamoral, R., & Matras, J.-J. (1967). *Problèmes d'acoustique des salles et des studios*. Paris : Chiron.
- Landström, U. (2004). Ventilation noise and its effects on annoyance and performance. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 115(5), 2370-2370. <https://doi.org/10.1121/1.4779947>
- Landström, U., Kjellberg, A., & Byström, M. (1993). Acceptable Levels Of Sounds With Different Spectral Characteristics During The Performance Of A Simple And A Complex Non-auditory Task. *Journal of Sound and Vibration*, 160(3), 533-542. <https://doi.org/10.1006/jsvi.1993.1043>
- Landström, U., Kjellberg, A., Söderberg, L., & Nordström, B. (1991). The Effects of Broadband, Tonal and Masked Ventilation Noise on Performance, Wakefulness and Annoyance. *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*, 10(4), 112-122. <https://doi.org/10.1177/026309239101000402>
- Lane, R. D., McRae, K., Reiman, E. M., Chen, K., Ahern, G. L., & Thayer, J. F. (2009). Neural correlates of heart rate variability during emotion. *NeuroImage*, 44(1), 213-222. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2008.07.056>
- Laszlo, H. E., McRobie, E. S., Stansfeld, S. A., & Hansell, A. L. (2012). Annoyance and other reaction measures to changes in noise exposure — A review. *Science of The Total Environment*, 435 - 436, 551 - 562. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.06.112>
- Lavie, N., Hirst, A., de Fockert, J. W., & Viding, E. (2004). Load Theory of Selective Attention and Cognitive Control. *Journal of Experimental Psychology: General*, 133(3), 339-354.
- Lazarus, R. S., & Launier, R. (1978). Stress-Related Transactions between Person and Environment. Dans L. A. Pervin & M. Lewis (Éds), *Perspectives in Interactional Psychology* (pp. 287 - 327). Boston, MA : Springer US. https://doi.org/10.1007/978-1-4613-3997-7_12
- Le Bihan, D. (1998). *Mesure de la dynamique du plancher mécanique VASCO* (Rapport No. RTS 2/6148). ONERA, DDSS/Y.
- Le Bihan, D. (2000). *Contrôle actif vibroacoustique d'un panneau d'habillage d'hélicoptère, essais au sol* (Rapport No. RF 2/03005). ONERA, DDSS.
- Le Bihan, D. (2002). *Contrôle actif vibroacoustique d'un panneau d'habillage d'hélicoptère* (Rapport No. RT 6/05632). ONERA.
- Le Bihan, D., & Petitjean, B. (2000). *Active structural acoustic control for disturbances using feedback methodologies on a helicopter cabin demonstrator* (Rapport No. RT 1/571). ONERA, DMAE/DDSS.

- Lee, J., Francis, J. M., & Lily M. Wang. (2017). How tonality and loudness of noise relate to annoyance and task performance. *Noise Control Engineering Journal*, 65(2), 71-82. <https://doi.org/10.3397/1/376427>
- Lewis, C. A., Francis, L. J., Shevlin, N., & Forrest, S. (2002). Confirmatory Factor Analysis of the French Translation of the Abbreviated Form of the Revised Eysenck Personality Questionnaire (EPQR-A). *European Journal of Psychological Assessment*, 18(2), 179 - 185. <https://doi.org/10.1027//1015-5759.18.2.179>
- Li, Z., Snieder, H., Su, S., Ding, X., Thayer, J. F., Treiber, F. A., & Wang, X. (2009). A longitudinal study in youth of heart rate variability at rest and in response to stress. *International Journal of Psychophysiology*, 73(3), 212 - 217. <https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2009.03.002>
- Liberman, M. C., Epstein, M. J., Cleveland, S. S., Wang, H., & Maison, S. F. (2016). Toward a Differential Diagnosis of Hidden Hearing Loss in Humans. *PLOS ONE*, 11(9), e0162726. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0162726>
- Lichstein, K. L., Riedel, B. W., & Richman, S. L. (2000). The Mackworth Clock Test: A Computerized Version. *The Journal of Psychology*, 134(2), 153 - 161. <https://doi.org/10.1080/00223980009600858>
- Lieury, A. (2013). *Manuel visuel de psychologie cognitive - 3e éd* (3e édition revue et augmentée). Paris : Dunod.
- Ljungberg, J. K., & Neely, G. (2007a). Cognitive after-effects of vibration and noise exposure and the role of subjective noise sensitivity. *Journal of Occupational Health*, 49(2), 111–116. <https://doi.org/10.1539/joh.49.111>
- Ljungberg, J. K., & Neely, G. (2007b). Stress, subjective experience and cognitive performance during exposure to noise and vibration. *Journal of Environmental Psychology*, 27(1), 44–54. <https://doi.org/10.1016/j.jenvp.2006.12.003>
- Loeb, M. (1986). *Noise and Human Efficiency*. (S.I.): Wiley. (Google-Books-ID: 1T3nEGLwqQQC).
- Loeb, M., Holding, D. H., & Baker, M. A. (1982). Noise stress and circadian arousal in self-paced computation. *Motivation and Emotion*, 6(1), 43 - 48. <https://doi.org/10.1007/BF00992136>
- Lucini, D., Di Fede, G., Parati, G., & Pagani, M. (2005). Impact of Chronic Psychosocial Stress on Autonomic Cardiovascular Regulation in Otherwise Healthy Subjects. *Hypertension*, 46(5), 1201 - 1206. <https://doi.org/10.1161/01.HYP.0000185147.32385.4b>
- Luck, S. J. (2005). An Introduction to Event-Related Potentials and Their Neural Origins. *The MIT Press*, 2–50. <https://doi.org/10.1007/s10409-008-0217-3>
- Lundberg, U., & Frankenhaeuser, M. (1976). *Adjustment to noise stress. Reports from the Departement of Psychology*. (S.I.): University of Stockholm, the Psychological Laboratory.

- Lundberg, U., & Frankenhaeuser, M. (1978). Psychophysiological reactions to noise as modified by personal control over noise intensity. *Biological Psychology*, 6(1), 51-59. [https://doi.org/10.1016/0301-0511\(78\)90006-6](https://doi.org/10.1016/0301-0511(78)90006-6)
- Lusk, S. L., Gillespie, B., Hagerty, B. M., & Ziemba, R. A. (2004). Acute Effects of Noise on Blood Pressure and Heart Rate. *Archives of Environmental Health: An International Journal*, 59(8), 392-399. <https://doi.org/10.3200/AEOH.59.8.392-399>
- Macchi, L. (2015). *Réduction active du bruit pour l'amélioration du confort acoustique dans les cabines d'hélicoptères* (Modeling and Simulation). Université de Toulouse.
- Macken, W. J., Phelps, F. G., & Jones, D. M. (2009). What causes auditory distraction? *Psychonomic Bulletin & Review*, 16(1), 139 - 144. <https://doi.org/10.3758/PBR.16.1.139>
- Mackworth, N. H. (1950). Researches on the Measurement of Human Performance. Dans *Selected papers on human factors in the design and use of control systems* (pp. 174-331). London, England : H M Stationary Office. Repéré à <https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/19502703894>
- Mahapatra, D. R., Gopalakrishnan, S., & Balachandran, B. (2001). Active feedback control of multiple waves in helicopter gearbox support struts. *Smart Materials and Structures*, 10(5), 1046-1058. <https://doi.org/10.1088/0964-1726/10/5/321>
- Maier, R., Hoffmann, F., Tewes, S., & Bebesel, M. (2002). Active Vibration Isolation System for Helicopter Interior Noise Reduction. Dans *8th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference & Exhibit* (Vol. 2495). <https://doi.org/10.2514/6.2002-2495>
- Makeig, S. (1993). Auditory Event-Related Dynamics of the EEG Spectrum and Effects of Exposure to Tones. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 86(4), 283-293.
- Makoto, M. (s.d.). Makoto's preprocessing pipeline - SCCN. Repéré à https://scn.ucsd.edu/wiki/Makoto%27s_preprocessing_pipeline
- Malik, M., Bigger, J. T., Camm, A. J., Kleiger, R. E., Malliani, A., Moss, A. J., & Schwartz, P. J. (1996). Heart rate variability: Standards of measurement, physiological interpretation, and clinical use. *European Heart Journal*, 17(3), 354-381. <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.eurheartj.a014868>
- Mandrick, K., Peysakhovich, V., Rémy, F., Lepron, E., & Causse, M. (2016). Neural and psychophysiological correlates of human performance under stress and high workload. *Biological Psychology*, 121, 62 - 73. <https://doi.org/10.1016/j.biopsycho.2016.10.002>
- Marrot, F., Caillet, J., Roulois, G., & Crozat, P. (2011). Comfort methodology and comfort indicators applied on helicopter noise. Dans *37th European Rotorcraft Forum 2011*. Repéré à <https://dspace-erf.nlr.nl/xmlui/handle/20.500.11881/843>

- Martin, R. C., Wogalter, M. S., & Forlano, J. G. (1988). Reading comprehension in the presence of unattended speech and music. *Journal of Memory and Language*, 27(4), 382-398. [https://doi.org/10.1016/0749-596X\(88\)90063-0](https://doi.org/10.1016/0749-596X(88)90063-0)
- Martin, W. L., Murray, P. S., & Bates, P. R. (2012). The Effects of Startle on Pilots During Critical Events: A Case Study Analysis. Communication présentée au 30th EAAP Conference: Aviation Psychology & Applied Human Factors, Griffith University, Brisbane, Australia. Repéré à <http://www.aavpa.org/read/375/30-eaap-conference-sardinia-italy.html>
- Martin, W. L., Murray, P. S., Bates, P. R., & Lee, P. S. Y. (2016). A Flight Simulator Study of the Impairment Effects of Startle on Pilots During Unexpected Critical Events. *Aviation Psychology and Applied Human Factors*, 6(1), 24 - 32. <https://doi.org/10.1027/2192-0923/a000092>
- Maschke, C., Arndt, D., Ising, H., Laude, G., Thierfelder, W., & Contzen, S. (1995). The effect of night time airplane noise on excretion of stress hormones in residents living near airports. *Schriftenreihe Des Vereins Fur Wasser-, Boden- Und Lufthygiene*, 96, 1-140, I-XIX.
- Mason, O. J., & Brady, F. (2009). The psychotomimetic effects of short-term sensory deprivation. *The Journal of Nervous and Mental Disease*, 197(10), 783-785. <https://doi.org/10.1097/NMD.0b013e3181b9760b>
- Massaro, S., & Pecchia, L. (2019). Heart Rate Variability (HRV) Analysis: A Methodology for Organizational Neuroscience. *Organizational Research Methods*, 22(1), 354-393. <https://doi.org/10.1177/1094428116681072>
- Matthews, G., Campbell, S. E., Falconer, S., Joyner, L. A., Huggins, J., Gilliland, K., ... Warm, J. S. (2002). Fundamental dimensions of subjective state in performance settings: Task engagement, distress, and worry. *Emotion*, 2(4), 315-340. <https://doi.org/10.1037/1528-3542.2.4.315>
- Matthews, G., Joyner, L., Gilliland, K., Campbell, S., Falconer, S., & Huggins, J. (1999). Validation of a Comprehensive Stress State Questionnaire: Towards a State « Big Three »? *Personality psychology in Europe*, 7, 335-350.
- McCraty, R., Atkinson, M., Tiller, W. A., Rein, G., & Watkins, A. D. (1995). The effects of emotions on short-term power spectrum analysis of heart rate variability. *The American Journal of Cardiology*, 76(14), 1089 - 1093. [https://doi.org/10.1016/S0002-9149\(99\)80309-9](https://doi.org/10.1016/S0002-9149(99)80309-9)
- Menelle, M., & Baroin, P. (2001). *Identification vibratoire du panneau d'habillage Dauphin 6075* (Rapport No. RT 1/03005). ONERA, DDSS.
- Miki, K., Kawamorita, K., Araga, Y., Musha, T., & Sudo, A. (1998). Urinary and Salivary Stress Hormone Levels While Performing Arithmetic Calculation in a Noisy Environment. *Industrial health*, 36(1), 66 - 69. <https://doi.org/10.2486/indhealth.36.66>
- Millott, T. A., Yoerkie Jr., C. A., Welsh, W. A., MacMartin, D. G., & Davis, M. W. (1998). Flight Test of Active Gear-Mesh Noise Control on the S-76 Aircraft. Dans *Annual Forum Proceedings - American Helicopter Society* (Vol. 54, pp. 241-250).

- Missonnier, P., Deiber, M.-P., Gold, G., Millet, P., Gex-Fabry Pun, M., Fazio-Costa, L., ... Ibáñez, V. (2006). Frontal theta event-related synchronization: comparison of directed attention and working memory load effects. *Journal of Neural Transmission*, 113(10), 1477-1486. <https://doi.org/10.1007/s00702-005-0443-9>
- Møller, A. R. (1962). Acoustic Reflex in Man. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 34(9B), 1524-1534. <https://doi.org/10.1121/1.1918384>
- Moricot, C. (2007). Le pilotage des avions automatisés. *Communications*, 81(1), 201–213. <https://doi.org/10.3406/comm.2007.2468>
- Mullen, T. (2012). NITRC: CleanLine: Tool/Resource Info. Repéré à <https://www.nitrc.org/projects/cleanline>
- Mullen, T., Kothe, C., Chi, Y. M., Ojeda, A., Kerth, T., Makeig, S., ... Jung, T. (2013). Real-time modeling and 3D visualization of source dynamics and connectivity using wearable EEG. Dans *2013 35th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC)* (pp. 2184-2187). <https://doi.org/10.1109/EMBC.2013.6609968>
- Muoio, V., Persson, P. B., & Sendeski, M. M. (2014). The neurovascular unit – concept review. *Acta Physiologica*, 210(4), 790 - 798. <https://doi.org/10.1111/apha.12250>
- Murdock Jr., B. B. (1962). The serial position effect of free recall. *Journal of Experimental Psychology*, 64(5), 482-488. <https://doi.org/10.1037/h0045106>
- Murphy, D. R., Craik, F. I. M., Li, K. Z. H., & Schneider, B. A. (2000). Comparing the effects of aging and background noise of short-term memory performance. *Psychology and Aging*, 15(2), 323 - 334. <https://doi.org/10.1037/0882-7974.15.2.323>
- Murray, B. S., & Wilby, J. F. (1978). Helicopter cabin noise: Methods of source and path identification and characterization (Vol. 2, pp. 583-594). Communication présentée au NASA. Langley Res. Center Helicopter Acoustics, Pt. 2, Cambridge, MA, United States : Bolt, Beranek, and Newman, Inc. Repéré à <https://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=19790002685>
- Muzammil, M., & Hasan, F. (2004). Human Performance under the Impact of Continuous and Intermittent Noise in a Manual Machining Task. *Noise & Vibration Worldwide*, 35(7), 10 - 15. <https://doi.org/10.1260/0957456041589836>
- Naserpour, M., Jafari, M. J., Monazzam, M. R., Shahneshin, P., R, H., Saremi, M., ... S. (2014). A study of students cognitive performance under noise exposure, using Continuous Performance Test "Study on the effects of noise on cognitive performances". *Journal of Health and Safety at Work*, 4(1), 41-54.
- Niedermeyer, E., & Silva, F. H. L. da. (2005). *Electroencephalography: Basic Principles, Clinical Applications, and Related Fields*. (S.l.) : Lippincott Williams & Wilkins. (Google-Books-ID: tndqYGPHQdEC).

- Nunez, P. L., Nunez, E. P. of B. E. P. L., Srinivasan, R., & Srinivasan, A. P. of C. S. R. (2006). *Electric Fields of the Brain: The Neurophysics of EEG*. (S.I.) : Oxford University Press. (Google-Books-ID: fUv54as56_8C).
- Nunez, P. L., & Srinivasan, R. (2006). A theoretical basis for standing and traveling brain waves measured with human EEG with implications for an integrated consciousness. *Clinical Neurophysiology*, 117(11), 2424 - 2435. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2006.06.754>
- O'Connell, J., Mathur, G., JanakiRam, R., Johnson, M., & Rossetti, D. J. (2001). Helicopter cabin noise reduction using active structural acoustic control. Dans *AHS*. Washington DC.
- Ohrström, E., Björkman, M., & Rylander, R. (1988). Noise annoyance with regard to neurophysiological sensitivity, subjective noise sensitivity and personality variables. *Psychological Medicine*, 18(3), 605-613.
- Oken, B. S., Salinsky, M. C., & Elsas, S. M. (2006). Vigilance, alertness, or sustained attention: physiological basis and measurement. *Clinical Neurophysiology*, 117(9), 1885-1901. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2006.01.017>
- Olson, H. F., & May, E. G. (1953). Electronic Sound Absorber. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 25(6), 1130 - 1136. <https://doi.org/10.1121/1.1907249>
- Paas, F. G. W. C., Tuovinen, J. E., Tabbers, H., & Gerven, P. W. M. V. (2003). Cognitive Load Measurement as a Means to Advance Cognitive Load Theory. *Educational Psychologist*, 38(1), 63 - 71. https://doi.org/10.1207/S15326985EP3801_8
- Paas, F. G. W. C., van Merriënboer, J. J. G., & Adam, J. J. (1994). Measurement of Cognitive Load in Instructional Research. *Perceptual and Motor Skills*, 79(1), 419-430. <https://doi.org/10.2466/pms.1994.79.1.419>
- Parizet, E. (2006). *Perception acoustique et qualité sonore. Techniques de l'Ingénieur* (Rapport No. R6140 V1).
- Park, K. S., Choi, H., Lee, K. J., Lee, J. Y., An, K. O., & Kim, E. J. (2011). Patterns of electroencephalography (EEG) change against stress through noise and memorization test. *International Journal of Medicine and Medical Sciences*, 3(14), 381-389. <https://doi.org/10.5897/IJMMMS11.001>
- Parmentier, F. B. R. (2014). The cognitive determinants of behavioral distraction by deviant auditory stimuli: a review. *Psychological Research*, 78(3), 321-338. <https://doi.org/10.1007/s00426-013-0534-4>
- Paus, T., Zatorre, R. J., Hofle, N., Caramanos, Z., Gotman, J., Petrides, M., & Evans, A. C. (1997). Time-Related Changes in Neural Systems Underlying Attention and Arousal During the Performance of an Auditory Vigilance Task. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 9(3), 392 - 408. <https://doi.org/10.1162/jocn.1997.9.3.392>
- Pedrotti, M., Mirzaei, M. A., Tedesco, A., Chardonnet, J.-R., Mérienne, F., Benedetto, S., & Baccino, T. (2014). Automatic Stress Classification With Pupil Diameter

- Analysis. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 30(3), 220-236. <https://doi.org/10.1080/10447318.2013.848320>
- Pesonen, M., Hämäläinen, H., & Krause, C. M. (2007). Brain oscillatory 4–30 Hz responses during a visual n-back memory task with varying memory load. *Brain Research*, 1138, 171-177. <https://doi.org/10.1016/j.brainres.2006.12.076>
- Pfurtscheller, G., Stancák Jr., A., & Neuper, Ch. (1996). Event-related synchronization (ERS) in the alpha band — an electrophysiological correlate of cortical idling: A review. *International Journal of Psychophysiology*, 24(1–2), 39 - 46. [https://doi.org/10.1016/S0167-8760\(96\)00066-9](https://doi.org/10.1016/S0167-8760(96)00066-9)
- Porges, S. W. (1995). Cardiac vagal tone: A physiological index of stress. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 19(2), 225 - 233. [https://doi.org/10.1016/0149-7634\(94\)00066-A](https://doi.org/10.1016/0149-7634(94)00066-A)
- Posner, M. I., & Boies, S. J. (1971). Components of attention. *Psychological Review*, 78(5), 391-408. <https://doi.org/10.1037/h0031333>
- Posner, M. I., Nissen, M. J., & Klein, R. M. (1976). Visual dominance: An information-processing account of its origins and significance. *Psychological Review*, 83(2), 157-171. <https://doi.org/10.1037/0033-295X.83.2.157>
- Poulton, E. C. (1979). Composite model for human performance in continuous noise. *Psychological Review*, 86(4), 361 - 375. <https://doi.org/10.1037/0033-295X.86.4.361>
- Proverbio, A. M., Benedetto, F. D., Ferrari, M. V., & Ferrarini, G. (2018). When listening to rain sounds boosts arithmetic ability. *PLOS ONE*, 13(2), e0192296. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0192296>
- Quintana, D. S., Guastella, A. J., Outhred, T., Hickie, I. B., & Kemp, A. H. (2012). Heart rate variability is associated with emotion recognition: Direct evidence for a relationship between the autonomic nervous system and social cognition. *International Journal of Psychophysiology*, 86(2), 168 - 172. <https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2012.08.012>
- Rabbitt, P., Osman, P., Moore, B., & Stollery, B. (2001). There are stable individual differences in performance variability, both from moment to moment and from day to day. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology Section A*, 54(4), 981-1003. <https://doi.org/10.1080/713756013>
- Raghavachari, S., Kahana, M. J., Rizzuto, D. S., Caplan, J. B., Kirschen, M. P., Bourgeois, B., ... Lisman, J. E. (2001). Gating of Human Theta Oscillations by a Working Memory Task. *Journal of Neuroscience*, 21(9), 3175-3183.
- Ray, W. J., & Cole, H. W. (1985). EEG activity during cognitive processing: Influence of attentional factors. *International Journal of Psychophysiology*, 3(1), 43-48. [https://doi.org/10.1016/0167-8760\(85\)90018-2](https://doi.org/10.1016/0167-8760(85)90018-2)
- Rayner, K., Chace, K. H., Slattery, & Ashby, J. (2006). Eye Movements as Reflections of Comprehension Processes in Reading. *Scientific Studies of Reading*, 10(3), 241 -255. https://doi.org/10.1207/s1532799xssr1003_3

- Reisberg, D. (2013). *Cognition: Exploring the Science of the Mind* (6^e éd.). (S.I.) : City College of New York Custom Edition.
- Riese, H. (1999). Mental Fatigue after Very Severe Closed Head Injury: Sustained Performance, Mental Effort, and Distress at Two Levels of Workload in a Driving Simulator. *Neuropsychological Rehabilitation*, 9(2), 189 - 205. <https://doi.org/10.1080/713755600>
- Robert, J., & Hockey, G. (1997). Compensatory control in the regulation of human performance under stress and high workload: A cognitive-energetical framework. *Biological Psychology*, 45(1-3), 73 - 93. [https://doi.org/10.1016/S0301-0511\(96\)05223-4](https://doi.org/10.1016/S0301-0511(96)05223-4)
- Robinson, O. J., Vytal, K., Cornwell, B. R., & Grillon, C. (2013). The impact of anxiety upon cognition: perspectives from human threat of shock studies. *Frontiers in Human Neuroscience*, 7. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2013.00203>
- Romani, G. L., Williamson, S. J., & Kaufman, L. (1982). Tonotopic organization of the human auditory cortex. *Science*, 216(4552), 1339 - 1340. <https://doi.org/10.1126/science.7079770>
- Romanò, M. (2015). *Text Atlas of Practical Electrocardiography: A Basic Guide to ECG Interpretation*. (S.I.) : Springer. (Google-Books-ID: qH8QBwAAQBAJ).
- Ruotolo, F., Senese, V. P., Ruggiero, G., Maffei, L., Masullo, M., & Iachini, T. (2012). Individual reactions to a multisensory immersive virtual environment: the impact of a wind farm on individuals. *Cognitive Processing*, 13(1), 319-323. <https://doi.org/10.1007/s10339-012-0492-6>
- Ryherd, E. E., & Wang, L. M. (2007). Effects of exposure duration and type of task on subjective performance and perception in noise. *Noise Control Engineering Journal*, 55(3), 334-347. <https://doi.org/10.3397/1.2724764>
- Ryherd, E. E., & Wang, L. M. (2008). Implications of human performance and perception under tonal noise conditions on indoor noise criteria. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 124(1), 218 - 226. <https://doi.org/10.1121/1.2932075>
- Sabri, M., Humphries, C., Verber, M., Liebenthal, E., Binder, J. R., Mangalathu, J., & Desai, A. (2014). Neural effects of cognitive control load on auditory selective attention. *Neuropsychologia*, 61, 269 - 279. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2014.06.009>
- Salamé, P., & Baddeley, A. (1982). Disruption of short-term memory by unattended speech: Implications for the structure of working memory. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, 21(2), 150-164. [https://doi.org/10.1016/S0022-5371\(82\)90521-7](https://doi.org/10.1016/S0022-5371(82)90521-7)
- Salamé, P., & Wittersheim, G. (1978). Selective noise disturbance of the information input in short-term memory. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 30(4), 693-704. <https://doi.org/10.1080/14640747808400694>
- Sammer, G., Blecker, C., Gebhardt, H., Bischoff, M., Stark, R., Morgen, K., & Vaitl, D. (2007). Relationship between regional hemodynamic activity and simultaneously recorded EEG-theta associated with mental arithmetic-

- induced workload. *Human Brain Mapping*, 28(8), 793 - 803. <https://doi.org/10.1002/hbm.20309>
- Sarafian, D., & Andeol, G. (2012). Problématique de bouchons d'oreilles en aéronautique militaire. Dans *Proceedings of the Acoustics 2012 Nantes Conference*. Nantes.
- Scharinger, C., Kammerer, Y., & Gerjets, P. (2015). Pupil Dilation and EEG Alpha Frequency Band Power Reveal Load on Executive Functions for Link-Selection Processes during Text Reading. *PLoS ONE*, 10(6). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0130608>
- Schlegel, R. E. (1993). Chapter 17. Driver Mental Workload. Dans *Automotive Ergonomics* (pp. 359 - 382). (S.I.): Taylors and Francis Ltd. Repéré à <https://trid.trb.org/view/385974>
- Schlittmeier, S. J., Feil, A., Liebl, A., & Hellbrück, J. (2015). The impact of road traffic noise on cognitive performance in attention-based tasks depends on noise level even within moderate-level ranges. *Noise & Health*, 17(76), 148-157. <https://doi.org/10.4103/1463-1741.155845>
- Schreckenber, D., Griefahn, B., & Meis, M. (2010). The associations between noise sensitivity, reported physical and mental health, perceived environmental quality, and noise annoyance. *Noise and Health*, 12(46), 7. <https://doi.org/10.4103/1463-1741.59995>
- Selye, H. (1975). Stress and distress. *Comprehensive therapy*, 1(8), 9-13.
- Seraganian, P., Szabo, A., & Brown, T. G. (1997). The Effect of Vocalization on the Heart Rate Response to Mental Arithmetic. *Physiology & Behavior*, 62(2), 221 -224. [https://doi.org/10.1016/S0031-9384\(97\)00102-9](https://doi.org/10.1016/S0031-9384(97)00102-9)
- Shahid, A., Wilkinson, K., Marcu, S., & Shapiro, C. M. (2012). Karolinska Sleepiness Scale (KSS). Dans A. Shahid, K. Wilkinson, S. Marcu, & C. M. Shapiro (Éds), *STOP, THAT and One Hundred Other Sleep Scales* (pp. 209-210). New York, NY : Springer New York. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-9893-4_47
- Shepherd, D., Heinonen-Guzejev, M., Hautus, M. J., & Heikkilä, K. (2015). Elucidating the relationship between noise sensitivity and personality. *Noise and Health*, 17(76), 165. <https://doi.org/10.4103/1463-1741.155850>
- Simon, F., & Biron, D. (2002). *Mise au point sur panneau Dauphin 6075, essais vol* (Rapport No. RTS 7/05632). ONERA, DDSS/DMAE.
- Simon, F., Haase, T., Unruh, O., Pohl, M., Tijs, E., Wijntjes, R., ... Ghiringhelli, G. L. (2014). Activities of european research laboratories regarding helicopter internal noise. *Journal AerospaceLab*, (AL07-04), 1 - 14. <https://doi.org/10.12762/2014.AL07-04>
- Simon, F., & Pauzin, S. (1999). Active noise control procedures into a generic composite helicopter cabin (p. 4). Communication présentée au Joint EAA/ASA Meeting, Berlin.
- Simon, F., & Pauzin, S. (2000a). *Active structural control of helicopter cabin internal noise* (Rapport No. RF 1/571.2F). ONERA, DMAE/Y.

- Simon, F., & Puzin, S. (2000b). Adaptive active experiment to reduce multi-tonal noise in a generic composite helicopter cabin. Dans *26th European Rotorcraft Forum* (pp. 35-35). The Hague.
- Simon, F., & Puzin, S. (2002). *Mise au point de procédure de contrôle actif vibroacoustique de panneau d'habillage sur Dauphin 6075: essais vol* (Rapport No. RF3/03005 DMAE/DDSS). ONERA.
- Simon, F., Puzin, S., & Biron, D. (2004). Optimisation of sandwich trim panels for reducing helicopter internal noise (p. 9). Communication présentée au ERF30, Marseille.
- Sloan, R. P., Korten, J. B., & Myers, M. M. (1991). Components of heart rate reactivity during mental arithmetic with and without speaking. *Physiology & Behavior*, *50*(5), 1039-1045. [https://doi.org/10.1016/0031-9384\(91\)90434-P](https://doi.org/10.1016/0031-9384(91)90434-P)
- Smith, A. P. (1989). A review of the effects of noise on human performance. *Scandinavian Journal of Psychology*, *30*(3), 185 - 206. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9450.1989.tb01082.x>
- Smith, A. P. (1991). Noise and aspects of attention. *British Journal of Psychology*, *82*(3), 313-324.
- Smith, A. P. (2012). An update on noise and performance: Comment on Szalma and Hancock (2011). *Psychological Bulletin*, *138*(6), 1262 - 1268. <https://doi.org/10.1037/a0028867>
- Smith, A. P., & Broadbent, D. E. (1985). The effects of noise on the naming of colours and reading of colour names. *Acta Psychologica*, *58*(3), 275 - 285. [https://doi.org/10.1016/0001-6918\(85\)90026-5](https://doi.org/10.1016/0001-6918(85)90026-5)
- Smith, J. C. (1993). *Understanding stress and coping*. New York, NY, England : Macmillan Publishing Co, Inc.
- Snyder, B., & Snyder, R. (2000). *Music and Memory: An Introduction*. (S.I.) : MIT Press. (Google-Books-ID: Nln3xTYQwt4C).
- So, W. K. Y., Wong, S. W. H., Mak, J. N., & Chan, R. H. M. (2017). An evaluation of mental workload with frontal EEG. *PLOS ONE*, *12*(4), e0174949. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0174949>
- Sörqvist, P. (2014). On interpretation and task selection in studies on the effects of noise on cognitive performance. *Frontiers in Psychology*, *5*. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2014.01249>
- Sörqvist, P., Halin, N., & Hygge, S. (2010). Individual differences in susceptibility to the effects of speech on reading comprehension. *Applied Cognitive Psychology*, *24*(1), 67-76. <https://doi.org/10.1002/acp.1543>
- Spreng, M. (2000). Possible health effects of noise induced cortisol increase. *Noise and Health*, *2*(7), 59.
- Stansfeld, S. A., Berglund, B., Clark, C., Lopez-Barrio, I., Fischer, P., Öhrström, E., ... Berry, B. F. (2005). Aircraft and road traffic noise and children's cognition and health: A cross-national study. *Lancet*, *365*(9475), 1942-1949. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(05\)66660-3](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(05)66660-3)

- Stansfeld, S. A., Clark, C. R., Jenkins, L. M., & Tarnopolsky, A. (1985). Sensitivity to noise in a community sample: I. Measurement of psychiatric disorder and personality. *Psychological Medicine*, *15*(2), 243 - 254. <https://doi.org/10.1017/S0033291700023527>
- Stein, P. K., & Boutcher, S. H. (1993). Heart-Rate and Blood-Pressure Responses to Speech Alone Compared with Cognitive Challenges in the Stroop Task. *Perceptual and Motor Skills*, *77*(2), 555 - 563. <https://doi.org/10.2466/pms.1993.77.2.555>
- Sutton, T. J., Elliott, S. J., Brennan, M. J., Heron, K. H., & Jessop, D. A. C. (1997). Active Isolation of Multiple Structural Waves on a Helicopter Gearbox Support Strut. *Journal of Sound and Vibration*, *205*(1), 81 - 101. <https://doi.org/10.1006/jsvi.1997.0972>
- Szalma, J. L., & Hancock, P. A. (2011). Noise effects on human performance: a meta-analytic synthesis. *Psychological Bulletin*, *137*(4), 682 - 707. <https://doi.org/10.1037/a0023987>
- Szalma, J. L., & Hancock, P. A. (2012). What's all the noise? Differentiating dimensions of acoustic stress and the limits to meta-analysis: Reply to Smith (2012). *Psychological Bulletin*, *138*(6), 1269 - 1273. <https://doi.org/10.1037/a0029509>
- Tafalla, R. J., & Evans, G. W. (1997). Noise, physiology, and human performance: The potential role of effort. *Journal of Occupational Health Psychology*, *2*(2), 148-155. <https://doi.org/10.1037/1076-8998.2.2.148>
- Thayer, J. F., Hansen, A. L., Saus-Rose, E., & Johnsen, B. H. (2009). Heart Rate Variability, Prefrontal Neural Function, and Cognitive Performance: The Neurovisceral Integration Perspective on Self-regulation, Adaptation, and Health. *Annals of Behavioral Medicine*, *37*(2), 141 - 153. <https://doi.org/10.1007/s12160-009-9101-z>
- Tiberghien, G., & Abdi, H. (2002). *Dictionnaire des sciences cognitives*. (S.l.) : Armand Colin. (Google-Books-ID: fQcSHAAACAAJ).
- Tiitinen, H. T., Sinkkonen, J., Reinikainen, K., Alho, K., Lavikainen, J., & Näätänen, R. (1993). Selective attention enhances the auditory 40-Hz transient response in humans. *Nature*, *364*(6432), 59-60. <https://doi.org/10.1038/364059a0>
- Tomaka, J., Blascovich, J., & Swart, L. (1994). Effects of vocalization on cardiovascular and electrodermal responses during mental arithmetic. *International Journal of Psychophysiology*, *18*(1), 23 - 33. [https://doi.org/10.1016/0167-8760\(84\)90012-6](https://doi.org/10.1016/0167-8760(84)90012-6)
- Trauzettel-Klosinski, S., & Dietz, K. (2012). Standardized assessment of reading performance: the New International Reading Speed Texts IReST. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, *53*(9), 5452 - 5461. <https://doi.org/10.1167/iovs.11-8284>
- Tremblay, S., & Jones, D. M. (1999). Change of Intensity Fails to Produce an Irrelevant Sound Effect: Implications for the Representation of Unattended Sound.

- Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 25(4), 1005-1015.
- Tremblay, S., MacKen, W. J., & Jones, D. M. (2001). The impact of broadband noise on serial memory: Changes in band-pass frequency increase disruption. *Memory*, 9(4-6), 323-331. <https://doi.org/10.1080/09658210143000010>
- Tyson, P. D. (1987). Task-related stress and EEG alpha biofeedback. *Biofeedback and Self-regulation*, 12(2), 105-119. <https://doi.org/10.1007/BF01000012>
- van Kamp, I., & Davies, H. (2008). Environmental noise and mental health: Five year review and future directions. Communication présentée au 9th International Congress on Noise as a Public Health Problem (ICBEN) 2008, Foxwoods, Connecticut.
- van Kempen, E., & Babisch, W. (2012). The quantitative relationship between road traffic noise and hypertension: a meta-analysis. *Journal of Hypertension*, 30(6), 1075. <https://doi.org/10.1097/HJH.0b013e328352ac54>
- van Winsun, W., Sergeant, J., & Geuze, R. (1984). The functional significance of event-related desynchronization of alpha rhythm in attentional and activating tasks. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 58(6), 519-524. [https://doi.org/10.1016/0013-4694\(84\)90042-7](https://doi.org/10.1016/0013-4694(84)90042-7)
- Viollon, S., Lavandier, C., & Drake, C. (2002). Influence of visual setting on sound ratings in an urban environment. *Applied Acoustics*, 63(5), 493 - 511. [https://doi.org/10.1016/S0003-682X\(01\)00053-6](https://doi.org/10.1016/S0003-682X(01)00053-6)
- von Wright, J., & Nurmi, L. (1979). Effects of white noise and irrelevant information on speeded classification: A developmental study. *Acta Psychologica*, 43(2), 157-166. [https://doi.org/10.1016/0001-6918\(79\)90021-0](https://doi.org/10.1016/0001-6918(79)90021-0)
- Voßkühler, A., Nordmeier, V., Kuchinke, L., & Jacobs, A. M. (2008). OGAMA (Open Gaze and Mouse Analyzer): Open-source software designed to analyze eye and mouse movements in slideshow study designs. *Behavior Research Methods*, 40(4), 1150-1162. <https://doi.org/10.3758/BRM.40.4.1150>
- Wasserman, C. S., & Segool, N. (2013). Working in and with Noise: The Impact of Audio Environment on Attention. *Journal of Neurotherapy*, 17(4), 203-212. <https://doi.org/10.1080/10874208.2013.847147>
- Watkins, S., Dalton, P., Lavie, N., & Rees, G. (2007). Brain Mechanisms Mediating Auditory Attentional Capture in Humans. *Cerebral Cortex*, 17(7), 1694-1700. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhl080>
- Waugh, N. C., & Norman, D. A. (1965). Primary memory. *Psychological Review*, 72(2), 89-104. <https://doi.org/10.1037/h0021797>
- Weden, G. J., & Coy, J. . J. (1984). Summary of drive-train component technology in helicopters. Communication présentée au NATO-AGARD PEP 64th Symp. on Gears and Power Transmissions for Helicopters and Turboprops, Lisbon, Portugal. Repéré à <https://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=19840022225>

- Wegner, D. M., & Erber, R. (1992). The hyperaccessibility of suppressed thoughts. *Journal of Personality and Social Psychology*, 63(6), 903 - 912. <https://doi.org/10.1037/0022-3514.63.6.903>
- Weinstein, N. D. (1978). Individual differences in reactions to noise: A longitudinal study in a college dormitory. *Journal of Applied Psychology*, 63(4), 458-466. <https://doi.org/10.1037/0021-9010.63.4.458>
- White, K. K., Bronkhorst, A. W., & Meeter, M. (2017a). Annoyance by transportation noise: The effects of source identity and tonal components. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 141(5), 3137 - 3144. <https://doi.org/10.1121/1.4982921>
- White, K. K., Bronkhorst, A. W., & Meeter, M. (2017b). The role of noise sensitivity in acute physiological effects of noise. Communication présentée au IC BEN - International Conference on Biological Effects of Noise. Repéré à <https://www.semanticscholar.org/paper/The-role-of-noise-sensitivity-in-acute-effects-of-White-Bronkhorst/2e655f790ed7e2450d774bfe3e626d87b75ed881>
- White, K. K., Meeter, M., & Bronkhorst, A. (2012). Effects of transportation noise and attitudes on noise annoyance and task performance. Dans *41st International Congress and Exposition on Noise Control Engineering 2012, INTER-NOISE 2012, 19 August 2012 through 22 August 2012, New York, NY; Code 98805, 9, 7329-7337*. Repéré à <https://repository.tudelft.nl/view/tno/uuid:d2e15237-a76f-4bee-ad5e-712e22140b04>
- Wilkinson, R. T. (1963). Interaction of noise with knowledge of results and sleep deprivation. *Journal of Experimental Psychology*, 66(4), 332 - 337. <https://doi.org/10.1037/h0044161>
- Wright, B. A., Peters, E. R., Ettinger, U., Kuipers, E., & Kumari, V. (2016). Moderators of noise-induced cognitive change in healthy adults. *Noise & Health*, 18(82), 117-132. <https://doi.org/10.4103/1463-1741.181995>
- Yang, J., McClelland, A., & Furnham, A. (2016). The effect of background music on the cognitive performance of musicians: A pilot study. *Psychology of Music*, 44(5), 1202-1208. <https://doi.org/10.1177/0305735615592265>
- Yerkes, R. M., & Dodson, J. D. (1908). The relation of strength of stimulus to rapidity of habit-formation. *Journal of Comparative Neurology and Psychology*, 18(5), 459-482. <https://doi.org/10.1002/cne.920180503>
- Yeung, A. C., Vekshtein, V. I., Krantz, D. S., Vita, J. A., Ryan, T. J., Ganz, P., & Selwyn, A. P. (1991). The Effect of Atherosclerosis on the Vasomotor Response of Coronary Arteries to Mental Stress. *New England Journal of Medicine*, 325(22), 1551-1556. <https://doi.org/10.1056/NEJM199111283252205>
- Young, M. S., Brookhuis, K. A., Wickens, C. D., & Hancock, P. A. (2015). State of science: mental workload in ergonomics. *Ergonomics*, 58(1), 1 - 17. <https://doi.org/10.1080/00140139.2014.956151>

- Zanto, T. P., & Gazzaley, A. (2014). Attention and Ageing. *The Oxford Handbook of Attention*, 927 - 971.
<https://doi.org/10.1093/oxfordhb/9780199675111.013.020>
- Zhao, C., Zhao, M., Liu, J., & Zheng, C. (2012). Electroencephalogram and electrocardiograph assessment of mental fatigue in a driving simulator. *Accident Analysis & Prevention*, 45, 83 - 90.
<https://doi.org/10.1016/j.aap.2011.11.019>
- Zipf, G. K. (1932). *Selected Studies of the Principle of Relative Frequency in Language*. (S.I.) : Cambridge, MA: Harvard University Press.
- Zipf, G. K. (1949). *Human behavior and the principle of least effort*. Oxford, England : Addison-Wesley Press.
- Zwicker, E., & Fastl, H. (2013). *Psychoacoustics: Facts and Models*. (S.I.) : Springer Science & Business Media. (Google-Books-ID: WLvtCAAQBAJ).

7. ANNEXES

Annexe 1 : CERNI



Toulouse, le lundi 10 juillet 2017

Dr Mickaël Causse
ISAE Toulouse

CERNI : Comité d’Ethique sur les Recherches Non-Interventionnelles

Le bureau (Courriel : bureau-cerni@univ-toulouse.fr)

Objet : Avis sur le projet « Evaluation de l’impact du bruit de cabine d’hélicoptère sur les performances cognitives » présenté par Dr Mickaël Causse de l’ISAE, Toulouse.

Monsieur,

Compte tenu des éléments fournis dans votre demande, le Comité d’Ethique pour les Recherches Non-Interventionnelles émet un **AVIS FAVORABLE**. Le comité formule néanmoins une recommandation : merci d’explicitier à vos participants (des élèves de l’ISAE) que le refus de participer, ou le fait de quitter l’expérience à n’importe quel moment que ce soit, n’affectera pas leurs relations avec l’école ou leurs professeurs.

Nous rappelons, par ailleurs, qu’il relève de la responsabilité des chercheurs de se conformer à leurs obligations légales notamment en ce qui concerne les aspects « informatique et liberté », ou encore l’homologation du lieu de recherche.

Numéro de l’avis : CERNI-Université fédérale de Toulouse-2017-042

A Toulouse,

Le bureau du CERNI : Pr Maria Teresa Munoz Sastre Dr Pascal Ducourneau Pr Jacques Py

CERNI - Université Fédérale Toulouse Midi-Pyrénées

41, Allées Jules Guesde - CS 61321 - 31013 Toulouse CEDEX 6 - Tél : 05 61 14 80 10 - Télécopie : 05 61 14 80 20
Courriel : contact@univ-toulouse.fr
www.univ-toulouse.fr

Annexe 2 : Filtrés utilisés pour le traitement des signaux acoustiques

```
function Hd = filterDesigner_bandstop(Freq)
%FILTERDESIGNER_BANDSTOP Returns a discrete-time filter object.

% MATLAB Code
% Generated by MATLAB(R) 9.3 and DSP System Toolbox 9.5.
% Generated on: 05-Oct-2017 13:39:07

% Butterworth Bandstop filter designed using FDESIGN.BANDSTOP.

% All frequency values are in Hz.
Fs = 48000; % Sampling Frequency

Fstop1 = Freq - 0.5 ; % First Stopband Frequency
Fpass1 = Freq - 1 ; % First Passband Frequency
Fpass2 = Freq + 1 ; % Second Passband Frequency
Fstop2 = Freq + 0.5 ; % Second Stopband Frequency

Apass1 = 0.5; % First Passband Ripple (dB)
Astop = 60; % Stopband Attenuation (dB)
Apass2 = 1; % Second Passband Ripple (dB)
match = 'stopband'; % Band to match exactly

% Construct an FDESIGN object and call its BUTTER method.
h = fdesign.bandstop(Fpass1, Fstop1, Fstop2, Fpass2, Apass1, Astop, ...
    Apass2, Fs);
Hd = design(h, 'butter', 'MatchExactly', match);
```

Figure 127 : Fonction Matlab permettant d'appliquer un filtre Butterworth aux signaux acoustiques

```
function Hd = filterDesigner_bandpass_2(Freq)
%FILTERDESIGNER_BANDPASS_2 Returns a discrete-time filter object.

% MATLAB Code
% Generated by MATLAB(R) 9.3 and DSP System Toolbox 9.5.
% Generated on: 11-Oct-2017 15:50:23

% Elliptic Bandpass filter designed using FDESIGN.BANDPASS.

% All frequency values are in Hz.
Fs = 48000; % Sampling Frequency

Fstop1 = Freq -1; % First Stopband Frequency
Fpass1 = Freq-0.5; % First Passband Frequency
Fpass2 = Freq+0.5; % Second Passband Frequency
Fstop2 = Freq+1; % Second Stopband Frequency
Astop1 = 60; % First Stopband Attenuation (dB)
Apass = 1; % Passband Ripple (dB)
Astop2 = 80; % Second Stopband Attenuation (dB)
match = 'pass'; % Band to match exactly

% Construct an FDESIGN object and call its ELLIP method.
h = fdesign.bandpass(Fstop1, Fpass1, Fpass2, Fstop2, Astop1, Apass, ...
    Astop2, Fs);
Hd = design(h, 'ellip', 'MatchExactly', match);
```

Figure 128 : Fonction Matlab permettant d'appliquer un filtre passe-bande elliptique aux signaux acoustiques

Annexe 3 : Résultats des corrélations pour la tâche TNT

Tableau 18 : Coefficients de corrélations de rang de Spearman pour les résultats comportementaux de la TNT. Les corrélations significatives ($p < 0.05$) sont signalées en rouge.

Métriques	Difficulté	Conditions sonores	âge	sexe	latéralité	niveau d'étude	sensibilité au bruit	neuroticisme	extra-version	empan endroit	empan envers
Réponses correctes	0-back	brut	-0,06	0,44	0,45	0,28	0,18	-0,05	0,10	-0,34	0,09
		filtre tonalités	0,01	0,39	0,12	0,42	-0,07	0,00	0,17	0,00	-0,16
		filtre HF	0,13	0,34	0,37	0,15	0,19	0,04	-0,30	-0,04	0,19
		filtre BF	-0,04	0,24	0,29	0,31	0,10	0,00	0,12	-0,07	0,16
		filtre isophonique	-0,38	0,40	0,27	0,23	-0,01	-0,18	0,30	0,05	0,16
		silence	-0,06	0,23	0,15	0,47	0,10	-0,28	0,04	-0,01	0,33
	2-back	brut	-0,39	-0,10	0,28	0,17	-0,09	-0,35	-0,14	-0,40	-0,05
		filtre tonalités	-0,43	-0,01	0,26	0,10	-0,10	-0,34	-0,14	-0,20	0,00
		filtre HF	-0,56	0,23	0,35	-0,12	0,19	-0,25	-0,25	-0,21	-0,15
		filtre BF	-0,73	0,04	0,32	-0,03	0,03	-0,14	-0,12	0,05	-0,24
		filtre isophonique	-0,65	0,13	0,25	0,08	0,04	-0,23	0,03	-0,04	-0,01
		silence	-0,62	0,04	0,03	0,12	-0,22	-0,32	0,10	-0,04	0,08
Réponses incorrectes	0-back	brut	-0,17	-0,03	-0,31	-0,71	0,13	0,12	-0,16	0,12	-0,18
		filtre tonalités	-0,09	-0,32	0,00	-0,54	0,21	0,21	-0,28	0,00	-0,08
		filtre HF	-0,19	-0,36	-0,34	-0,04	-0,10	-0,09	0,28	-0,02	-0,19
		filtre BF	-0,13	-0,43	-0,22	-0,21	-0,19	0,10	-0,03	0,19	-0,42
		filtre isophonique	0,29	-0,49	-0,15	-0,21	0,06	0,12	-0,20	-0,03	-0,12
		silence	0,12	-0,14	-0,08	-0,38	-0,02	0,42	0,18	-0,08	-0,26
	2-back	brut	-0,09	-0,22	0,01	-0,32	0,41	-0,02	0,02	-0,16	0,15
		filtre tonalités	-0,04	-0,03	-0,18	-0,26	0,06	0,09	0,43	0,16	-0,09
		filtre HF	0,29	-0,43	-0,21	0,28	-0,29	0,30	0,46	0,32	-0,01
		filtre BF	0,18	-0,15	-0,12	-0,15	0,26	0,31	0,23	0,04	0,01
		filtre isophonique	0,47	-0,31	-0,18	-0,07	-0,15	0,23	0,28	0,09	-0,08
		silence	0,48	-0,34	-0,13	0,13	-0,06	0,30	0,22	0,48	-0,05
Temps de réaction	0-back	brut	0,09	0,17	-0,49	0,05	-0,04	-0,05	0,19	0,32	-0,09
		filtre tonalités	0,33	0,14	-0,49	0,20	-0,38	0,06	0,43	0,13	0,02
		filtre HF	0,22	0,14	-0,20	0,15	-0,20	0,23	0,51	0,37	0,19
		filtre BF	0,44	0,20	-0,38	0,08	-0,26	0,13	0,23	0,16	0,04
		filtre isophonique	0,42	-0,17	-0,35	0,11	-0,30	0,04	0,04	0,08	0,12
		silence	0,17	0,35	-0,23	-0,04	-0,23	0,15	0,21	0,38	0,10
	2-back	brut	0,36	0,29	-0,14	0,12	0,07	-0,11	0,04	0,06	0,22
		filtre tonalités	0,29	0,43	-0,40	0,27	-0,06	-0,09	0,18	0,10	-0,07
		filtre HF	0,26	0,35	-0,17	0,09	0,08	0,07	0,33	0,17	0,02
		filtre BF	0,37	0,49	-0,29	0,16	0,04	-0,15	-0,02	-0,18	0,00
		filtre isophonique	0,34	0,32	-0,20	-0,03	0,00	-0,24	-0,06	0,00	0,12
		silence	0,14	0,49	-0,23	-0,30	0,08	-0,07	-0,06	-0,08	-0,09

Tableau 19 : Coefficients de corrélations de rang de Spearman pour les résultats subjectifs de la TNT. Les corrélations significatives ($p < 0.05$) sont signalées en rouge.

Métriques										
	Conditions sonores	âge	sexe	latéralité	niveau d'étude	habitude de travail	sensibilité au bruit	neuroticisme	extra-version	
fatigue ressentie	brut	-0,11	-0,22	0,24	0,32	-0,36	-0,10	0,20	-0,03	
	filtre tonalités	-0,02	-0,15	0,37	0,25	-0,11	0,09	0,35	-0,08	
	filtre HF	-0,12	0,16	0,22	0,29	-0,12	-0,06	0,14	-0,13	
	filtre BF	-0,33	-0,06	0,21	0,24	-0,13	0,01	0,09	0,06	
	filtre isophonique	0,23	0,00	0,27	0,43	-0,15	-0,13	0,18	-0,01	
	silence	-0,02	0,10	0,28	0,40	-0,13	-0,07	0,22	-0,01	
Difficulté ressentie	0-back	brut	0,05	-0,20	0,00	-0,05	-0,23	-0,31	0,28	0,46
		filtre tonalités	0,11	-0,29	0,12	-0,08	-0,23	-0,08	0,33	0,26
		filtre HF	-0,08	-0,17	0,00	-0,05	-0,15	-0,28	0,33	0,41
		filtre BF	0,00	-0,23	0,00	-0,24	-0,23	-0,14	0,30	0,23
		filtre isophonique	0,03	-0,26	0,15	-0,05	-0,41	-0,04	0,34	0,33
		silence	-0,03	-0,28	-0,34	-0,01	-0,15	-0,37	0,07	0,30
	2-back	brut	0,20	0,18	-0,06	-0,04	-0,10	-0,05	0,41	0,47
		filtre tonalités	0,26	-0,12	-0,12	0,09	-0,23	-0,07	0,31	0,67
		filtre HF	0,25	-0,10	-0,04	0,15	-0,28	-0,05	0,36	0,72
		filtre BF	0,34	-0,10	0,06	0,11	-0,31	-0,08	0,34	0,66
		filtre isophonique	0,33	-0,06	0,00	0,20	-0,38	-0,01	0,33	0,62
		silence	0,33	-0,03	-0,10	0,10	-0,07	-0,20	0,27	0,64
Perception subjective des conditions sonores	intensité	brut	0,02	-0,38	0,13	-0,34	-0,07	-0,18	0,38	-0,23
		filtre tonalités	0,23	-0,27	-0,17	0,08	0,01	-0,27	0,18	0,24
		filtre HF	-0,07	-0,04	-0,06	-0,03	-0,20	-0,05	0,07	0,34
		filtre BF	0,38	-0,12	0,15	-0,20	-0,03	-0,13	0,12	0,05
		filtre isophonique	0,28	-0,23	0,06	0,09	-0,32	0,08	0,13	0,52
		silence								
	grave	brut	-0,05	-0,18	-0,14	0,13	0,06	-0,18	-0,02	0,29
		filtre tonalités	0,03	-0,32	0,39	-0,15	-0,03	0,29	0,54	-0,14
		filtre HF	0,02	-0,22	0,37	0,13	-0,27	0,40	0,07	-0,16
		filtre BF	0,14	-0,27	-0,03	0,32	-0,51	-0,03	-0,04	0,08
		filtre isophonique	0,24	-0,30	-0,09	0,06	-0,01	-0,14	0,16	0,11
		silence								
	medium	brut	0,01	0,03	-0,18	0,15	-0,36	-0,25	0,24	0,43
		filtre tonalités	-0,19	0,00	0,17	-0,05	0,20	-0,12	0,44	0,50
		filtre HF	-0,11	-0,27	-0,51	0,22	-0,01	-0,42	-0,22	0,76
		filtre BF	-0,05	-0,12	0,00	-0,30	0,05	-0,08	0,62	0,14
		filtre isophonique	0,36	-0,03	0,03	0,12	-0,28	0,04	0,18	0,39

	silence	-0,18	0,08	-0,08	-0,17	0,25	-0,28	0,23	-0,33
aigu	brut	-0,14	-0,03	0,06	-0,11	-0,07	0,06	-0,07	-0,11
	filtre tonalités	0,30	-0,04	-0,47	-0,04	-0,30	-0,14	0,06	0,24
	filtre HF	-0,14	0,07	-0,38	-0,35	0,11	-0,13	0,22	0,11
	filtre BF	0,35	-0,06	-0,31	-0,12	-0,26	-0,17	0,17	0,39
	filtre isophonique	0,17	-0,31	0,10	-0,06	-0,40	0,24	0,42	0,16
	silence								
tonal	brut	-0,42	0,04	-0,06	-0,35	0,50	-0,07	0,05	0,15
	filtre tonalités	0,12	0,03	-0,44	0,08	0,07	-0,06	-0,29	0,41
	filtre HF	-0,29	0,07	-0,21	-0,37	0,35	-0,05	0,06	0,36
	filtre BF	0,03	-0,04	-0,47	-0,15	0,19	-0,21	0,06	0,39
	filtre isophonique	0,22	-0,25	-0,30	0,03	0,06	0,00	0,00	0,30
	silence								
fluctuant	brut	-0,23	-0,01	0,12	-0,18	0,21	-0,08	0,32	0,27
	filtre tonalités	-0,01	-0,04	-0,31	-0,30	0,08	0,09	0,06	0,08
	filtre HF	-0,55	0,36	0,15	-0,02	0,36	0,16	0,11	0,06
	filtre BF	0,25	-0,02	-0,11	-0,09	-0,30	0,32	0,17	0,06
	filtre isophonique	0,06	-0,16	0,39	-0,08	-0,13	0,30	0,55	0,02
	silence	0,32	0,08	-0,08	0,33	0,25	-0,38	0,23	0,22
distrayant	brut	-0,45	-0,01	0,35	-0,41	-0,07	0,33	0,30	0,00
	filtre tonalités	-0,15	-0,18	-0,01	-0,04	-0,36	0,34	0,11	0,17
	filtre HF	-0,42	0,19	-0,09	-0,04	-0,04	-0,14	0,09	0,51
	filtre BF	-0,28	-0,16	0,09	0,04	-0,42	0,34	-0,05	0,28
	filtre isophonique	-0,43	0,04	0,28	-0,31	-0,04	0,33	0,45	0,26
	silence								
agaçant	brut	-0,36	-0,16	0,16	-0,39	0,07	0,00	0,29	0,15
	filtre tonalités	-0,08	-0,11	-0,05	-0,45	-0,04	-0,10	0,47	0,22
	filtre HF	-0,26	0,09	0,01	-0,37	0,18	-0,20	0,30	0,31
	filtre BF	0,04	-0,31	0,06	-0,31	-0,03	-0,21	0,13	0,23
	filtre isophonique	-0,29	0,18	0,15	-0,38	0,16	-0,13	0,52	0,31
	silence								
fatigant	brut	-0,35	-0,15	0,17	-0,34	-0,07	0,08	0,20	0,23
	filtre tonalités	-0,47	0,13	0,24	-0,14	-0,09	0,25	0,13	0,29
	filtre HF	-0,53	-0,01	0,16	0,04	0,05	-0,11	0,09	0,26
	filtre BF	-0,22	-0,01	-0,09	0,23	-0,20	-0,28	-0,35	0,33
	filtre isophonique	-0,44	-0,01	0,26	-0,24	-0,05	0,34	0,27	0,34
	silence								
habitué	brut	-0,04	0,39	0,09	-0,14	0,19	0,13	0,03	0,04
	filtre tonalités	-0,50	0,15	0,40	-0,35	0,29	0,25	0,07	-0,07
	filtre HF	0,37	-0,13	-0,39	0,00	-0,06	0,17	-0,16	-0,04
	filtre BF	-0,30	0,37	-0,13	-0,36	0,34	0,04	0,05	-0,22

Annexe 4 : Résultats des corrélations pour la tâche de lecture

Tableau 20: Coefficients de corrélations de rang de Spearman pour les résultats comportementaux de la tâche de lecture. Les corrélations significatives ($p < 0.05$) sont signalées en rouge.

Métriques	Conditions sonores	âge	sexe	latéralité	niveau d'étude	habitude de travail	sensibilité au bruit	neuroticisme	extraversion
temps de lecture	Brut	-0,24	-0,19	0,38	-0,26	0,01	0,03	0,28	-0,03
	filtre tonalités	-0,11	-0,07	0,30	-0,18	0,13	-0,02	0,27	-0,14
	filtre HF	0,06	0,12	0,38	-0,12	0,11	0,09	0,26	-0,12
	filtre BF	-0,02	0,07	0,26	-0,18	0,11	-0,06	0,14	-0,22
	filtre isophonique	-0,20	-0,07	0,38	-0,24	0,04	-0,02	0,20	-0,10
	silence	-0,10	0,04	0,38	-0,24	-0,01	-0,01	0,20	-0,18
nombre de fixations	Brut	-0,45	0,01	0,30	-0,30	-0,10	0,12	0,03	0,07
	filtre tonalités	-0,66	-0,26	0,22	-0,47	-0,07	0,05	0,06	0,12
	filtre HF	-0,54	-0,18	0,30	-0,28	-0,36	0,24	0,12	0,11
	filtre BF	-0,65	-0,34	0,30	-0,32	-0,29	0,05	0,14	0,25
	filtre isophonique	-0,77	-0,46	0,26	-0,17	-0,40	-0,03	-0,02	-0,08
	silence	-0,83	-0,39	0,30	-0,27	-0,34	0,09	-0,04	0,10
longueur des saccades	Brut	0,51	0,10	-0,26	0,13	0,15	-0,05	0,20	-0,08
	filtre tonalités	0,56	0,20	-0,22	0,27	0,08	-0,05	0,06	-0,02
	filtre HF	0,24	0,08	-0,17	0,07	0,17	-0,22	-0,04	-0,02
	filtre BF	0,33	0,21	-0,26	0,20	0,08	0,08	0,03	-0,39
	filtre isophonique	0,56	0,24	-0,22	0,09	0,23	0,18	0,25	0,00
	silence	0,64	0,32	-0,30	0,25	0,12	0,03	0,13	-0,24
nombre de régressions	Brut	-0,52	-0,02	0,30	-0,27	-0,26	0,17	0,10	-0,14
	filtre tonalités	-0,68	-0,27	0,17	-0,35	-0,16	0,07	0,01	0,09
	filtre HF	-0,40	-0,10	0,22	-0,03	-0,40	0,29	0,09	-0,01
	filtre BF	-0,54	-0,25	0,35	-0,30	-0,32	0,01	0,14	0,24
	filtre isophonique	-0,62	-0,20	0,34	-0,19	-0,40	0,00	0,12	-0,06
	silence	-0,77	-0,38	0,30	-0,24	-0,26	0,09	-0,02	0,03

Tableau 21: Coefficients de corrélations de rang de Spearman pour les résultats subjectifs de la tâche de lecture. Les corrélations significatives ($p < 0.05$) sont signalées en rouge.

Métriques		Conditions sonores	âge	sexe	latéralité	niveau d'étude	habitude de travail	sensibilité au bruit	neuroticisme	extra-version	
		fatigue ressentie	brut		0,05	0,15	0,20	-0,07	-0,24	-0,13	0,06
filtre tonalités			0,10	0,15	-0,08	-0,05	0,23	-0,28	-0,06	0,02	
filtre HF			0,04	-0,04	-0,02	-0,03	0,08	-0,40	0,01	0,02	
filtre BF			0,21	-0,15	-0,14	-0,12	0,16	-0,28	0,12	-0,29	
filtre isophonique			-0,15	0,02	0,04	-0,10	0,23	-0,40	-0,02	0,37	
silence			0,30	0,27	0,24	-0,05	0,24	-0,16	0,19	0,04	
Difficulté ressentie	brut		-0,02	0,01	-0,33	0,14	0,17	-0,24	-0,19	0,19	
	filtre tonalités		-0,33	0,04	0,04	-0,03	-0,59	0,39	0,38	-0,22	
	filtre HF		-0,44	-0,05	0,16	-0,24	-0,38	0,14	0,46	-0,26	
	filtre BF		-0,34	0,12	0,04	-0,02	-0,39	0,16	0,11	-0,11	
	filtre isophonique		-0,26	0,18	0,16	-0,28	-0,39	0,28	0,42	-0,19	
	silence		-0,29	0,21	0,32	-0,08	-0,44	0,23	0,36	-0,36	
Perception subjective des conditions sonores	intensité	brut		-0,22	0,03	-0,25	0,10	-0,22	0,24	-0,15	0,13
		filtre tonalités		0,20	-0,08	-0,06	-0,28	0,07	0,14	0,04	0,03
		filtre HF		-0,09	0,22	-0,19	0,09	-0,05	0,21	-0,11	0,05
		filtre BF		0,17	0,05	-0,29	-0,31	0,25	0,12	0,09	-0,09
		filtre isophonique		-0,15	-0,01	-0,30	0,05	0,04	0,22	-0,08	0,11
		silence		0,00	0,19	-0,05	-0,06	0,25	0,06	0,34	-0,10
	grave	brut		-0,02	0,04	-0,29	-0,18	0,15	0,00	-0,12	-0,43
		filtre tonalités		0,16	0,01	0,28	-0,34	-0,15	0,18	0,23	0,13
		filtre HF		-0,31	0,14	-0,18	-0,20	0,03	0,25	0,06	0,26
		filtre BF		-0,10	-0,13	0,00	-0,46	0,14	0,01	-0,09	0,34
		filtre isophonique		-0,14	-0,02	-0,24	-0,21	0,24	0,12	0,04	-0,13
		silence		0,00	0,27	-0,08	-0,09	0,36	-0,13	0,00	0,11
	medium	brut		0,16	0,01	0,12	-0,40	0,05	-0,05	0,42	-0,01
		filtre tonalités		-0,21	-0,21	-0,08	0,17	-0,35	-0,04	-0,18	-0,01
		filtre HF		0,24	0,24	0,31	-0,32	-0,39	0,25	0,08	-0,30
filtre BF			-0,12	-0,18	-0,14	-0,28	0,07	0,08	0,23	0,36	
filtre isophonique			0,03	-0,08	0,33	-0,51	0,24	-0,14	0,16	0,36	

	aigu	silence	0,13	0,34	-0,10	-0,11	0,45	-0,24	-0,21	0,03
		brut	0,01	-0,22	0,27	-0,02	-0,23	0,34	0,17	0,36
		filtre tonalités	-0,10	-0,26	0,04	-0,14	0,34	-0,40	-0,06	0,07
		filtre HF	0,12	-0,49	0,02	-0,07	-0,02	-0,09	0,03	-0,18
		filtre BF	0,14	0,02	0,31	-0,16	0,07	0,21	0,29	-0,17
		filtre isophonique	-0,14	-0,49	-0,32	-0,09	0,23	-0,08	-0,07	0,01
		silence	0,00	0,19	-0,05	-0,06	0,25	0,06	0,34	-0,10
	tonal	brut	0,28	0,24	-0,12	0,05	0,10	0,28	0,15	-0,23
		filtre tonalités	0,24	-0,39	0,20	-0,59	0,37	-0,31	0,20	0,09
		filtre HF	-0,25	-0,18	-0,34	0,06	0,23	-0,04	0,15	0,02
		filtre BF	-0,04	-0,01	0,14	-0,13	0,42	0,02	0,24	0,09
		filtre isophonique	-0,03	-0,45	-0,26	-0,39	0,22	-0,20	0,07	0,11
		silence	0,00	0,19	-0,05	-0,06	0,25	0,06	0,34	-0,10
	fluctuant	brut	-0,23	-0,04	-0,14	0,23	-0,24	0,32	-0,06	-0,12
		filtre tonalités	0,19	-0,30	0,21	-0,50	0,14	0,00	0,34	0,10
		filtre HF	-0,19	-0,36	-0,33	-0,13	0,16	-0,06	-0,22	0,11
		filtre BF	-0,19	-0,08	-0,10	-0,10	-0,29	0,58	0,19	-0,16
		filtre isophonique	-0,32	-0,32	-0,27	-0,17	0,29	-0,09	-0,35	0,28
		silence	-0,12	0,34	-0,10	0,15	0,00	0,14	-0,12	-0,06
	distayant	brut	-0,35	-0,04	-0,08	0,02	-0,37	0,28	-0,02	0,15
		filtre tonalités	-0,02	-0,18	0,12	-0,35	-0,11	0,14	0,26	0,08
		filtre HF	-0,33	-0,02	-0,04	-0,05	-0,04	-0,05	-0,11	0,28
		filtre BF	-0,07	0,00	0,02	-0,22	-0,29	0,41	0,15	-0,03
		filtre isophonique	-0,06	-0,06	-0,20	-0,08	-0,20	0,13	0,04	-0,12
		silence	-0,12	0,34	-0,10	0,14	0,02	0,14	-0,09	-0,06
	agaçant	brut	-0,12	0,08	-0,20	-0,03	-0,34	0,31	0,18	-0,17
		filtre tonalités	0,12	-0,05	0,12	-0,40	-0,28	0,19	0,44	-0,19
filtre HF		-0,30	-0,08	-0,32	0,08	-0,09	-0,02	0,10	0,03	
filtre BF		0,06	0,13	-0,04	-0,30	-0,15	0,19	0,29	-0,24	
filtre isophonique		-0,12	-0,26	-0,20	-0,15	-0,17	0,04	0,33	-0,12	
silence		-0,14	0,27	-0,08	0,21	-0,15	0,33	0,12	-0,24	
fatigant	brut	-0,03	0,02	0,02	-0,16	-0,49	0,30	0,36	-0,19	
	filtre tonalités	0,22	0,00	0,31	-0,38	-0,27	0,16	0,48	-0,09	
	filtre HF	-0,13	-0,04	-0,22	0,07	-0,22	0,06	0,11	-0,10	

		filtre BF	0,28	0,21	0,24	-0,32	-0,19	0,20	0,43	-0,10
		filtre isophonique	0,11	-0,14	0,10	-0,25	-0,42	0,29	0,42	-0,31
		silence	0,00	0,27	-0,08	-0,09	0,36	-0,13	0,00	0,11
	habituat	brut	0,11	0,06	0,00	0,09	0,37	-0,35	-0,21	-0,08
		filtre tonalités	-0,23	0,03	-0,14	0,08	0,41	-0,42	-0,41	0,09
		filtre HF	0,09	0,05	0,18	-0,09	-0,05	0,03	0,14	-0,19
		filtre BF	-0,54	-0,14	-0,33	0,38	0,11	-0,53	-0,49	0,24
		filtre isophonique	-0,14	0,06	0,02	-0,06	0,20	-0,39	-0,22	0,11
		silence	-0,09	0,28	0,29	-0,08	0,35	-0,40	-0,31	0,08
	stress	brut	0,03	0,02	-0,02	-0,03	-0,46	0,30	0,41	-0,26
		filtre tonalités	0,06	-0,22	0,19	-0,31	-0,43	0,12	0,42	-0,17
		filtre HF	0,05	0,02	0,14	0,13	-0,44	0,19	0,28	-0,07
		filtre BF	0,23	0,22	0,14	-0,35	0,00	0,19	0,21	-0,06
		filtre isophonique	0,03	-0,17	0,19	-0,19	-0,37	0,20	0,39	-0,16
		silence	0,00	0,19	-0,05	-0,06	0,25	0,06	0,34	-0,10

Annexe 5 : Résultats des corrélations pour la tâche de repos

Tableau 22: Coefficients de corrélations de rang de Spearman pour les résultats subjectifs de la tâche de repos. Les corrélations significatives ($p < 0.05$) sont signalées en rouge.

Métriques		Conditions sonores	âge	sexe	latéralité	niveau d'étude	habitude de travail	sensibilité au bruit	neuroticisme	extra-version
		fatigue ressentie	brut		-0,17	-0,15	-0,19	0,12	0,08	0,18
filtre tonalités			-0,55	-0,28	-0,37	-0,14	0,02	0,07	0,22	0,10
filtre HF			-0,39	-0,20	-0,44	-0,02	0,09	0,08	0,29	0,02
filtre BF			-0,28	-0,24	-0,38	-0,09	0,15	0,01	0,24	0,13
filtre isophonique			-0,30	-0,36	0,11	-0,39	0,08	0,33	-0,08	0,06
silence			-0,56	-0,46	-0,29	0,02	-0,13	0,34	0,24	0,01
Perception subjective des conditions sonores	intensité	brut	0,06	0,09	-0,08	0,13	0,00	0,06	0,01	-0,16
		filtre tonalités	0,05	0,02	0,18	0,03	-0,09	0,43	-0,16	-0,25
		filtre HF	-0,04	0,22	0,08	0,10	-0,12	0,29	-0,01	-0,36
		filtre BF	-0,05	0,11	0,13	0,12	-0,03	0,28	-0,02	-0,37
		filtre isophonique	0,24	0,36	0,09	0,27	0,13	0,03	0,02	-0,30
		silence								
	grave	brut	-0,09	-0,06	-0,29	0,51	-0,13	0,13	0,14	0,04
		filtre tonalités	-0,34	-0,38	0,40	-0,34	-0,33	0,58	-0,13	-0,12
		filtre HF	-0,32	-0,21	-0,51	-0,20	-0,44	0,40	-0,03	-0,29
		filtre BF	-0,22	0,02	-0,38	-0,03	-0,23	-0,07	-0,24	-0,19
		filtre isophonique	-0,15	-0,24	-0,19	0,28	-0,16	0,24	0,09	-0,33
		silence								
	medium	brut	0,29	-0,03	0,06	0,14	0,31	-0,43	-0,22	0,00
		filtre tonalités	0,20	-0,17	-0,30	0,34	0,17	-0,03	0,32	-0,01
		filtre HF	0,28	0,03	0,00	0,35	0,33	-0,23	0,14	-0,44
		filtre BF	-0,22	-0,24	-0,02	-0,08	-0,09	-0,17	-0,34	-0,44
		filtre isophonique	0,11	0,09	-0,15	-0,13	-0,13	0,02	0,14	-0,17
		silence								
	aigu	brut	0,00	-0,23	-0,21	-0,28	0,01	0,18	0,17	-0,04
		filtre tonalités	-0,13	0,21	0,15	-0,12	-0,42	0,25	-0,08	0,18
		filtre HF	0,05	-0,06	0,25	0,14	-0,06	0,02	-0,27	-0,08
		filtre BF	-0,13	-0,08	-0,26	-0,74	0,06	0,07	-0,31	0,01

		filtre isophonique	-0,02	0,10	-0,48	-0,07	-0,12	-0,10	-0,03	0,03
		silence								
	tonal	brut	0,27	0,56	-0,27	-0,08	0,08	-0,06	0,13	-0,21
		filtre tonalités	-0,03	0,25	-0,44	0,36	-0,16	-0,15	0,21	0,04
		filtre HF	0,23	0,47	0,38	0,06	-0,39	0,49	-0,23	-0,23
		filtre BF	0,41	0,35	-0,11	-0,09	0,10	-0,14	-0,22	-0,01
		filtre isophonique	0,08	0,26	-0,56	0,12	0,03	-0,14	0,12	0,01
		silence								
	fluctuant	brut	-0,03	-0,29	-0,11	0,05	0,06	0,13	0,49	0,35
		filtre tonalités	-0,11	-0,46	-0,46	0,06	0,08	-0,12	0,25	0,34
		filtre HF	0,38	-0,18	-0,04	0,06	0,42	-0,18	0,18	0,25
		filtre BF	-0,32	-0,62	-0,34	0,18	0,01	0,25	0,25	0,21
		filtre isophonique	-0,18	-0,30	-0,32	0,25	0,15	-0,06	0,16	0,07
		silence								
	distrayant	brut	-0,39	-0,51	-0,13	0,10	0,08	0,10	0,40	-0,01
		filtre tonalités	-0,04	-0,39	0,13	0,30	-0,06	-0,01	0,31	-0,07
		filtre HF	0,15	-0,24	0,34	0,25	0,42	0,02	0,23	-0,40
		filtre BF	0,06	-0,33	0,27	-0,01	0,10	0,09	0,05	0,07
		filtre isophonique	0,09	-0,32	0,13	0,10	0,42	-0,11	0,31	-0,35
		silence	-0,26	-0,13	-0,14	0,04	-0,14	0,19	-0,26	-0,25
	agaçant	brut	-0,10	-0,07	0,17	0,19	-0,27	0,35	0,08	0,20
		filtre tonalités	0,12	-0,01	0,29	0,52	-0,30	0,50	0,11	-0,23
		filtre HF	0,31	0,24	0,36	0,48	-0,12	0,36	0,07	-0,21
		filtre BF	0,25	0,01	0,06	0,09	-0,09	0,31	-0,06	-0,25
		filtre isophonique	0,21	0,04	0,02	0,55	-0,07	0,25	0,18	-0,14
		silence	-0,30	-0,41	-0,18	0,05	-0,16	0,20	-0,29	-0,10
fatigant	brut	-0,17	-0,28	0,10	-0,19	-0,39	0,54	0,04	0,26	
	filtre tonalités	0,02	-0,15	-0,02	0,37	-0,04	0,22	0,16	-0,24	
	filtre HF	0,33	0,27	0,46	0,55	-0,24	0,50	0,11	-0,27	
	filtre BF	0,29	0,06	0,08	0,11	-0,14	0,21	-0,02	-0,08	
	filtre isophonique	0,15	-0,08	0,34	0,62	-0,03	0,25	0,31	0,02	
	silence	-0,26	-0,56	-0,14	0,04	0,11	0,01	-0,26	0,01	
habituation	brut	0,19	-0,01	-0,38	0,06	0,45	-0,49	0,13	-0,37	
	filtre tonalités	0,12	-0,11	-0,28	-0,03	0,36	-0,35	0,21	0,21	

		filtre HF	-0,62	-0,58	-0,44	-0,11	0,14	-0,25	0,03	-0,02
		filtre BF	0,14	-0,11	-0,32	-0,24	0,18	-0,48	-0,15	0,13
		filtre isophonique	-0,02	-0,05	-0,08	-0,03	0,30	-0,46	0,00	0,34
		silence	0,17	-0,02	0,00	-0,29	0,13	0,09	-0,18	-0,32
	stress	brut	-0,05	-0,08	0,19	0,14	-0,37	0,38	0,13	0,28
		filtre tonalités	0,16	0,09	0,26	0,53	-0,49	0,52	0,19	-0,09
		filtre HF	0,17	0,20	0,28	0,34	-0,22	0,41	0,29	-0,05
		filtre BF	0,07	-0,05	0,13	0,01	-0,24	0,36	-0,06	-0,21
		filtre isophonique	0,04	-0,09	0,17	0,47	-0,15	0,25	0,18	-0,15
		silence	-0,13	0,17	-0,10	0,03	-0,47	0,36	-0,10	-0,21

Annexe 6 : Résultats des corrélations de l'étude complémentaire

Tableau 23: Coefficients de corrélations de rang de Spearman pour les résultats comportementaux l'étude complémentaire. Les corrélations significatives ($p < 0.05$) sont signalées en rouge.

Tâche	Métriques	Difficulté	Conditions sonores	âge	sexe	latéralité	niveau d'étude	sensibilité au bruit	neuroticisme	extra-version	
			TNT								
	réponses correctes	0-back	silence	-0,07	-0,47	-0,56	0,22	0,12	-0,39	0,36	
			stationnaire	0,15	-0,11	-0,28	0,40	-0,10	-0,51	-0,07	
			fluctuant	0,06	-0,20	-0,21	0,27	0,19	-0,37	0,16	
		1-back	silence	0,06	-0,21	-0,32	0,52	-0,25	-0,36	-0,18	
			stationnaire	0,25	0,15	-0,32	0,32	-0,40	-0,28	-0,02	
			fluctuant	0,32	0,35	-0,21	0,41	0,01	0,31	-0,22	
		2-back	silence	-0,32	0,16	-0,42	0,06	0,23	0,27	0,23	
			stationnaire	0,58	-0,08	0,00	0,51	-0,43	-0,54	0,12	
			fluctuant	-0,06	0,15	-0,03	0,23	0,32	0,01	-0,34	
		réponses incorrectes	0-back	silence	0,07	0,47	0,56	-0,22	-0,12	0,39	-0,36
				stationnaire	-0,15	0,11	0,28	-0,40	0,10	0,51	0,07
				fluctuant	-0,06	0,20	0,21	-0,27	-0,19	0,37	-0,16
	1-back		silence	-0,06	0,21	0,32	-0,52	0,25	0,36	0,18	
			stationnaire	-0,25	-0,15	0,32	-0,32	0,40	0,28	0,02	
			fluctuant	-0,32	-0,35	0,21	-0,41	-0,01	-0,31	0,22	
	2-back		silence	0,32	-0,16	0,42	-0,06	-0,23	-0,27	-0,23	
			stationnaire	-0,58	0,08	0,00	-0,51	0,43	0,54	-0,12	
			fluctuant	0,06	-0,15	0,03	-0,23	-0,32	-0,01	0,34	
	temps de réaction		0-back	silence	-0,08	-0,20	0,38	-0,27	-0,13	0,12	-0,07
				stationnaire	0,19	-0,20	0,24	-0,19	-0,57	0,17	-0,11
				fluctuant	0,22	0,20	-0,10	0,05	-0,33	0,35	0,18
		1-back	silence	0,14	-0,24	0,45	-0,30	-0,12	-0,04	0,09	
			stationnaire	-0,04	-0,31	0,45	-0,49	-0,18	-0,04	0,00	
			fluctuant	-0,09	0,50	-0,17	-0,19	0,19	0,57	0,43	
2-back		silence	0,37	-0,39	0,45	-0,05	-0,37	-0,26	-0,07		
		stationnaire	0,21	-0,02	0,45	0,05	-0,17	0,05	-0,21		
		fluctuant	0,24	-0,17	0,03	-0,03	-0,47	0,25	-0,22		
Lecture	temps de lecture	silence	-0,31	-0,28	-0,31	-0,08	-0,21	-0,05	0,04		
		stationnaire	-0,23	-0,20	-0,17	0,03	-0,07	-0,14	0,07		
		fluctuant	-0,10	-0,35	-0,10	0,14	-0,24	-0,52	-0,02		
Horlog	sauts détectés	silence	-0,08	-0,15	0,11	-0,14	-0,07	0,16	0,19		
		stationnaire	0,24	0,13	0,25	0,36	0,12	-0,25	-0,11		

	sauts manqués	fluctuant	-0,21	-0,30	0,21	-0,39	-0,01	-0,29	0,33	
		silence	0,12	0,12	-0,11	0,20	0,06	-0,21	-0,22	
		stationnaire	-0,22	-0,12	-0,40	-0,27	-0,17	0,32	0,10	
	fausse alarmes	fluctuant	0,15	0,17	-0,39	0,32	-0,08	0,29	-0,23	
		silence	0,15	0,13	0,00	0,23	0,34	0,05	-0,21	
		stationnaire	-0,28	-0,02	-0,26	-0,20	0,13	0,19	0,26	
	temps de réaction	fluctuant	0,43	0,51	0,47	0,31	0,13	0,06	-0,46	
		silence	-0,36	-0,09	-0,38	-0,32	0,06	-0,06	-0,09	
		stationnaire	-0,29	0,17	-0,38	0,05	0,30	0,01	0,06	
			fluctuant	0,18	0,20	-0,45	0,30	-0,13	-0,07	-0,13

Tableau 24: Coefficients de corrélations de rang de Spearman pour les résultats subjectifs de l'étude complémentaire. Les corrélations significatives ($p < 0.05$) sont signalées en rouge.

Métriques		Conditions sonores	âge	sexe	latéralité	niveau d'étude	sensibilité au bruit	neuro-ticisme	extra-version
fatigue ressentie	TNT	silence	-0,32	0,47	0,11	-0,26	0,50	0,58	-0,04
		stationnaire	-0,15	0,17	0,28	-0,25	0,12	0,22	-0,09
		fluctuant	-0,29	-0,06	0,03	-0,40	0,15	0,24	0,23
	lecture	silence	-0,24	-0,19	0,00	-0,32	0,02	0,19	0,22
		stationnaire	-0,47	-0,21	0,04	-0,36	0,32	0,02	0,32
		fluctuant	-0,13	0,17	-0,04	-0,08	0,18	0,06	0,37
	horloge	silence	-0,17	0,21	-0,07	-0,17	0,12	0,21	0,17
		stationnaire	0,09	0,17	-0,11	-0,07	0,06	0,21	0,47
		fluctuant	-0,05	0,30	0,00	-0,10	0,24	0,24	0,46
difficulté ressenti	TNT	silence	0,04	0,23	0,38	-0,15	0,18	0,34	0,11
		stationnaire	0,01	0,25	0,43	-0,14	0,16	0,30	-0,10
		fluctuant	0,06	0,06	0,28	-0,30	0,15	0,17	0,51
	lecture	silence	0,12	-0,20	0,40	0,16	-0,09	-0,41	-0,20
		stationnaire	0,05	-0,33	0,29	0,14	0,06	-0,34	-0,17
		fluctuant	0,42	-0,15	0,38	0,05	-0,26	-0,14	-0,48
	horloge	silence	0,36	0,08	0,48	0,13	-0,02	-0,11	0,00
		stationnaire	-0,06	-0,13	0,39	-0,35	0,06	-0,02	0,13
		fluctuant	0,08	-0,17	0,36	-0,11	0,05	-0,16	0,10

Abstract

Development and implementation of a psycho-physio-acoustic approach for real-time control of noise impact in helicopter cabins

Environmental noise has well-known effects on humans. In the short term, it can be a source of stress, fatigue, or decreased alertness. However, the literature shows complex effects, it can, for example, be a source of pleasure and motivation. In the field of helicopter acoustics, cabin noise is particular because it has a wide frequency range (10-10000Hz). The noise of the main transmission gearbox is particularly unpleasant because it is tonal noise in frequency ranges (500-3000 Hz) close to speech (200-6000 Hz) to which humans are very sensitive. Passengers want to be able to work, read and rest without being annoyed, so one challenge for manufacturers is to improve sound comfort in the cabin. To reduce this noise, one solution is to use active noise control. Airbus Helicopters has developed a headrest system integrating speakers and microphones to generate an area around the passenger's head in which active noise control is performed. The addition of a multi-tone algorithm, designed to filter only emerging tones, allows a gain up to 4 dB(A), which represents a 15% reduction in discomfort. The purpose of this thesis was to define whether it is relevant to filter all these tones according to the passenger's current activity. In other words, this thesis aimed to better understand the impact of different helicopter cabin noises on cognitive performance and passenger comfort through subjective, behavioural (performance, oculometry) and psychophysiological (electroencephalography, electrocardiography) measurements. In order to simulate a passenger's activity, three tasks were selected: a "working" task (combining mental calculation, reasoning, and working memory), a reading task and finally a resting task. The results were compared with those obtained by the acoustic comfort scale developed by Airbus Helicopters. We find a good correspondence between this scale and our results. In addition, our behavioural and psychophysiological results show that, generally short exposure to helicopter noises has limited deleterious effects on task performance and creates only a slight increase in stress level, observable through the cerebral and cardiac activity. However, the subjective feeling is most impacted by noise, with a negative feeling associated to the noises with the most tones.

Keywords: Helicopter noise, Psychoacoustics, Physiological measurements, Acoustic comfort, Cognitive performance

Développent et mise en œuvre d'une approche psycho-physio-acoustique pour le contrôle temps réel de l'impact du bruit en cabine d'hélicoptère

Le bruit environnemental a des effets bien connus sur l'humain. A court terme, il peut être source de stress, de fatigue, ou de déconcentration. Pour autant, la littérature montre des effets complexes, il peut par exemple être source de plaisir et de motivation. Dans le domaine de l'acoustique hélicoptère, le bruit en cabine est particulier parce qu'il possède une large gamme de fréquence (10-10000Hz). Le bruit de la boîte de transmission principale est particulièrement désagréable parce qu'il s'agit d'un bruit de type tonal dans des gammes de fréquences (500-3000 Hz) proches de la parole (200-6000Hz) auxquelles l'humain est très sensible. Les passagers émettent le désir de pouvoir travailler, lire et se reposer sans être gêné, ainsi, un enjeu pour les constructeurs consiste à améliorer le confort sonore en cabine. Pour réduire ce bruit, une solution est d'utiliser le contrôle actif. Airbus Helicopters a développé un système d'appui-tête intégrant des haut-parleurs et des microphones permettant de générer une zone autour de la tête des passagers dans laquelle le contrôle actif est réalisé. L'ajout d'un algorithme multi-tonalité, visant à filtrer uniquement les tonalités émergentes, permet un gain allant jusqu'à 4 dB(A), ce qui représente une réduction de l'inconfort de 15%. L'objectif de cette thèse était de définir s'il est pertinent de filtrer toutes ces tonalités en fonction de l'activité courante du passager. Autrement dit, cette thèse visait à mieux cerner l'impact de différents bruits de cabine d'hélicoptère sur les performances cognitives et le confort des passagers, grâce à des mesures subjectives, comportementales (performance, oculométrie) et psychophysiques (électroencéphalographie, électrocardiographie). Afin de simuler l'activité d'un passager, trois tâches ont été sélectionnées : une tâche de « travail » (combinant calcul mental, raisonnement et mémoire de travail), une tâche de lecture et enfin une tâche de repos. Les résultats ont été comparés avec ceux obtenus par l'échelle de confort acoustique développée par Airbus Helicopters. Nous retrouvons une bonne correspondance entre cette échelle et nos résultats. Par ailleurs, nos résultats comportementaux et psychophysiques font apparaître qu'une exposition courte aux sons d'hélicoptères n'a généralement que très peu d'effets délétères sur les performances aux tâches et ne crée qu'une faible augmentation du niveau de stress, observable par l'activité cérébrale et cardiaque. Cependant, le ressenti subjectif est le plus impacté par le bruit, avec un ressenti négatif associé aux bruits ayant le plus de tonalités.

Mots clefs : Bruit d'hélicoptère, Psychoacoustique, Mesures physiologiques, Confort acoustique, Performances cognitives