



**Contribution à l'étude des effets
psychologiques du bruit de parole
dans les bureaux ouverts**

NS 367

NOTE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE

Contribution à l'étude des effets psychologiques du bruit de parole dans les bureaux ouverts

Krist Kostallari

NS 367
octobre 2019

N°d'ordre NNT : 2019LYSEI024

THESE de DOCTORAT DE L'UNIVERSITE DE LYON
opérée au sein de
Institut National de Recherche et de Sécurité



Ecole Doctorale N° 162
Mécanique, Energétique, Génie Civil, Acoustique

Spécialité/ discipline de doctorat :
Acoustique

Soutenue publiquement le 08/04/2019, par :
Krist Kostallari

**Contribution à l'étude des effets
psychologiques du bruit de parole dans
les bureaux ouverts**

Devant le jury composé de :

Mme BARD, Delphine (Présidente), Lectrice seigneur à l'Université de Lund		Rapporteure
Mme MELAN, Claudine	Professeure à l'Université de Toulouse 2	Rapporteure
M. LIEBL, Andreas	Professeur à HSD Hochschule Döpfer GmbH	Examineur
M. PARIZET, Etienne	Professeur à l'INSA de Lyon	Co-directeur
Mme GALY, Edith	Professeure à l'Université de Nice	Co-directrice
M. CHEVRET, Patrick	Chercheur HDR à l'INRS	Co-encadrant
M. LAURENT, Louis	Directeur des Etudes et Recherches à l'INRS	Invité

Département FEDORA – INSA Lyon - Ecoles Doctorales – Quinquennal 2016-2020

SIGLE	ECOLE DOCTORALE	NOM ET COORDONNEES DU RESPONSABLE
CHIMIE	<u>CHIMIE DE LYON</u> http://www.edchimie-lyon.fr Sec. : Renée EL MELHEM Bât. Blaise PASCAL, 3e étage secretariat@edchimie-lyon.fr INSA : R. GOURDON	M. Stéphane DANIELE Institut de recherches sur la catalyse et l'environnement de Lyon IRCELYON-UMR 5256 Équipe CDFA 2 Avenue Albert EINSTEIN 69 626 Villeurbanne CEDEX directeur@edchimie-lyon.fr
E.E.A.	<u>ÉLECTRONIQUE, ÉLECTROTECHNIQUE, AUTOMATIQUE</u> http://edeea.ec-lyon.fr Sec. : M.C. HAVGOUDOUKIAN ecole-doctorale.eea@ec-lyon.fr	M. Gérard SCORLETTI École Centrale de Lyon 36 Avenue Guy DE COLLONGUE 69 134 Écully Tél : 04.72.18.60.97 Fax 04.78.43.37.17 gerard.scorletti@ec-lyon.fr
E2M2	<u>ÉVOLUTION, ÉCOSYSTÈME, MICROBIOLOGIE, MODÉLISATION</u> http://e2m2.universite-lyon.fr Sec. : Sylvie ROBERJOT Bât. Atrium, UCB Lyon 1 Tél : 04.72.44.83.62 INSA : H. CHARLES secretariat.e2m2@univ-lyon1.fr	M. Philippe NORMAND UMR 5557 Lab. d'Ecologie Microbienne Université Claude Bernard Lyon 1 Bâtiment Mendel 43, boulevard du 11 Novembre 1918 69 622 Villeurbanne CEDEX philippe.normand@univ-lyon1.fr
EDISS	<u>INTERDISCIPLINAIRE SCIENCES-SANTÉ</u> http://www.ediss-lyon.fr Sec. : Sylvie ROBERJOT Bât. Atrium, UCB Lyon 1 Tél : 04.72.44.83.62 INSA : M. LAGARDE secretariat.ediss@univ-lyon1.fr	Mme Emmanuelle CANET-SOULAS INSERM U1060, CarMeN lab, Univ. Lyon 1 Bâtiment IMBL 11 Avenue Jean CAPELLE INSA de Lyon 69 621 Villeurbanne Tél : 04.72.68.49.09 Fax : 04.72.68.49.16 emmanuelle.canet@univ-lyon1.fr
INFOMATHS	<u>INFORMATIQUE ET MATHÉMATIQUES</u> http://edinfomaths.universite-lyon.fr Sec. : Renée EL MELHEM Bât. Blaise PASCAL, 3e étage Tél : 04.72.43.80.46 infomaths@univ-lyon1.fr	M. Luca ZAMBONI Bât. Braconnier 43 Boulevard du 11 novembre 1918 69 622 Villeurbanne CEDEX Tél : 04.26.23.45.52 zamboni@maths.univ-lyon1.fr
Matériaux	<u>MATÉRIAUX DE LYON</u> http://ed34.universite-lyon.fr Sec. : Stéphanie CAUVIN Tél : 04.72.43.71.70 Bât. Direction ed.materiaux@insa-lyon.fr	M. Jean-Yves BUFFIÈRE INSA de Lyon MATEIS - Bât. Saint-Exupéry 7 Avenue Jean CAPELLE 69 621 Villeurbanne CEDEX Tél : 04.72.43.71.70 Fax : 04.72.43.85.28 jean-yves.buffiere@insa-lyon.fr
MEGA	<u>MÉCANIQUE, ÉNERGÉTIQUE, GÉNIE CIVIL, ACOUSTIQUE</u> http://edmega.universite-lyon.fr Sec. : Stéphanie CAUVIN Tél : 04.72.43.71.70 Bât. Direction mega@insa-lyon.fr	M. Jocelyn BONJOUR INSA de Lyon Laboratoire CETHIL Bâtiment Sadi-Carnot 9, rue de la Physique 69 621 Villeurbanne CEDEX jocelyn.bonjour@insa-lyon.fr
ScSo	<u>ScSo*</u> http://ed483.univ-lyon2.fr Sec. : Viviane POLSINELLI Brigitte DUBOIS INSA : J.Y. TOUSSAINT Tél : 04.78.69.72.76 viviane.polsinelli@univ-lyon2.fr	M. Christian MONTES Université Lyon 2 86 Rue Pasteur 69 365 Lyon CEDEX 07 christian.montes@univ-lyon2.fr

*ScSo : Histoire, Géographie, Aménagement, Urbanisme, Archéologie, Science politique, Sociologie, Anthropologie

Remerciements

Mes plus vifs remerciements sont adressés à mes trois encadrants de thèse, Etienne Parizet, Edith Galy et Patrick Chevret, pour avoir eu la patience de travailler avec moi durant ces trois années, à la fois sur les objectifs de la thèse et sur l'amélioration de mes compétences de chercheur. Je remercie Etienne Parizet pour m'avoir guidé, écouté, fait pleinement confiance dans mes choix et pour m'avoir transmis avec efficacité son expérience et le savoir-faire d'un chercheur. Je remercie Edith Galy pour avoir éveillé et cultivé mes connaissances dans le domaine de la psychologie et pour sa disponibilité durant ces trois années. Enfin, je remercie Patrick Chevret pour m'avoir suivi au quotidien avec courage, pour m'avoir appris le plaisir des échanges scientifiques à travers nos longues discussions et pour son soutien professionnel dans le monde du travail.

Ces années de recherche sous cet encadrement auront été une expérience professionnelle, personnelle et riche d'information, au-delà de ce que je pouvais souhaiter.

Je remercie les membres du jury de cette thèse, Claudine Mélan, Delphine Bard, Andreas Liebl et Louis Laurent qui me font l'honneur d'évaluer ce travail avec intérêt et attention.

Mes remerciements s'adressent également à l'INRS et plus particulièrement au Laboratoire Acoustique au Travail, pour m'avoir accueilli chaleureusement. J'ai eu le plaisir et la chance de travailler dans un environnement à la fois professionnel, compétent et convivial. Merci à Isabelle et Nathalie G. pour leur aide à la réalisation des diverses tâches au quotidien, à Geneviève pour ses consignes d'une vie plus saine, à Jean-Noël pour son apport scientifique dans le projet, à Jonathan pour ses avis et ses références musicales de tous les jours, à Ossen et Kévin d'avoir partagé les différentes phases qu'un individu peut traverser lors d'une thèse de doctorat, à Joël pour les discussions poétiques et musicales, à Nicolas pour ses consignes précieuses et les discussions professionnelles et "vitales", à Lucas, Jean-Pierre et Julien pour les pauses détentes et le soutien moral et je n'oublie pas Nathalie J., merci pour ta présence, ton aide, ton soutien, ton apport scientifique et professionnel et les discussions amicales, philosophiques et riches d'information jusqu'à l'étape finale de cette thèse.

Je suis reconnaissant à mes amis du Master Recherche Acoustique, Le Mans 2015 : Léa, Clémence, Marine, Phil, Rémi, Romain, Léo, Thomas, Loïc, Matthias, Jean-Rémy, Georges et Maxime pour les fins de semaine de « pauses détentes » indispensables durant ce travail de thèse.

Enfin, mes plus profonds sentiments de remerciements et de gratitude sont consacrés à ma famille, merci à mes parents, Piro et Vasilika, pour leur présence et leurs consignes indispensable et leurs sacrifices durant toutes ces années de vie, sans lesquels tout cela ne serait absolument pas devenu une réalité. Merci à Enis, pour son soutien et d'avoir partagé son expérience qui a toujours apporté de la lumière dans mes pensées et mes actions, merci à Alex pour sa présence et ses discussions de qualité intellectuelle et finalement, merci à mon neveu Arthur Jon d'être arrivé dans ce monde et d'apporter en moi une naïve joie pure et sans contraintes. Faleminderit të gjithëve !

*« Le travail consiste en une tâche que l'on est obligé d'accomplir,
alors que le plaisir consiste en une occupation à laquelle on n'est pas obligé de se livrer. »*

« Les aventures de Tom Sawyer », Mark Twain, 1876

Résumé

Il est aujourd'hui accepté que le bruit de parole représente la principale source de gêne pour les employés des bureaux ouverts. L'objectif de ce travail est d'évaluer les effets psychophysologiques de la parole intelligible sur les salariés effectuant une ou plusieurs tâches. Pour répondre à cet objectif, deux expériences ont été réalisées.

La première a pour but d'évaluer le décrétement de performance (DP) lors d'une tâche de sériation pour de fortes valeurs d'intelligibilité. L'indicateur acoustique choisi est le STI (« Speech Transmission Index »). Les résultats de l'étude menée auprès de cinquante-cinq participants montrent un effet du STI sur le DP. Cependant, cette expérience a une validité écologique réduite puisqu'elle est de courte durée et qu'elle est limitée à une tâche très spécifique.

La deuxième expérience a donc pour but d'élaborer des tests en laboratoire plus proches des conditions de travail en bureau ouvert et d'étudier l'effet de la parole intelligible sur des indicateurs psychologiques. Trente-neuf participants ont participé à cette expérimentation. Plusieurs mesures telles que la fatigue psychologique, la gêne sonore et la charge mentale de travail ont été réalisées. Les participants ont été soumis à trois conditions sonores différentes (bruit stationnaire, bruit modulé et parole) durant trois journées. Chaque jour, les participants ont réalisé leur travail en étant exposés à la même condition sonore pendant 6h45min. Les résultats montrent un effet de la parole sur l'état psychologique des participants. La parole semble être la source de bruit la plus fatigante et la plus gênante. Elle entraîne également une charge mentale supplémentaire.

Au-delà des résultats de ces expériences, les modèles psychologiques mobilisés lors de cette thèse peuvent être adaptés pour mener des enquêtes *in-situ* afin d'évaluer et prévenir les risques psychologiques liés aux bruits dans les bureaux ouverts.

Mots-clés : Acoustique, Bruit, Intelligibilité, Parole, Gêne sonore, Fatigue psychologique, Charge mentale de travail, Mémoire, Bureau ouvert

Abstract

It seems now accepted that speech noise in open-plan offices is the main source of annoyance for employees. This work aims to evaluate the psychophysiological effects of intelligible speech on the employees performing one or multiple tasks. For this purpose, two experiments were conducted.

The first experiment evaluates the decrease in performance (DP) during a serial recall task for high values of speech intelligibility. The chosen acoustical indicator is the Speech Transmission Index (STI). Fifty-five subjects participated during this experiment. The results show a significant effect of the STI on the DP. However, this experiment does not reflect the reality of an open-plan office because of the specificity of the task performed during a brief period of time.

The second experiment aims to elaborate on laboratory tests which are closer to work conditions in an open-plan office and to evaluate the effect of intelligible speech on the psychological indicators. Thirty-nine subjects participated to the experiment. Different measurements such as psychological fatigue, sound annoyance and the cognitive workload were performed. The subjects were subduced to three different sound conditions (stationary noise, 'speech-like' amplitude-modulated noise and intelligible speech) during three days. For each day, the subjects did their work while being exposed to the same sound condition during six hours and forty-five minutes. The results show a significant effect of the speech condition on the psychological state of the subjects. The speech seems to be the most tiring and the most annoying sound source out of the three conditions. It also induces a supplementary cognitive workload.

Hereafter the results of these two experiments, the psychological models applied during this thesis could be adopted to conduct *in-situ* surveys for purposes of preventing the psychological hazards due to noise in open-plan offices.

Keywords : Acoustics, Noise, Intelligibility, Speech, Sound annoyance, Psychological fatigue, Cognitive workload, Memory, Open-plan office

Table des matières

1.	Introduction.....	21
2.	Etat de l’art.....	25
2.1.	Evaluation des effets de l’intelligibilité de la parole sur les tâches de sériation.....	25
2.1.1.	Evaluation de l’intelligibilité de la parole	27
2.1.2.	Mesure de l’ISE	30
2.1.3.	Evaluation des modulations de l’intensité sonore	35
2.2.	Mesures objectives et subjectives pour la réalisation d’une expérience de longue durée	41
2.2.1.	Méthodes de mesures de la fatigue ressentie	44
2.2.2.	Méthode de mesure de la charge mentale de travail	45
3.	Expérience de courte durée sur l’évaluation des effets de l’intelligibilité de la parole lors d’une tâche de sériation.....	49
3.1.	Hypothèses	49
3.2.	Méthodologie	51
3.2.1.	Dispositif expérimental.....	51
3.2.2.	Participants.....	52
3.2.3.	Phase préliminaire.....	53
3.2.4.	Expérience	56
3.3.	Résultats	61
3.3.1.	Résultats globaux.....	61
3.3.2.	Résultats selon les groupes de participants	66
3.4.	Conclusion	71
4.	Expérience de longue durée en vue d’une simulation d’une journée de travail en bureau ouvert	75
4.1.	Hypothèses	75
4.2.	Description expérimentale	76
4.2.1.	Banc expérimental.....	76

4.2.2.	Participants.....	78
4.2.3.	Stimuli sonore.....	Error! Bookmark not defined.
4.2.4.	Questionnaires	84
4.2.5.	Tâche de sériation	85
4.2.6.	Tâche de « revue de presse »	86
4.2.7.	Protocole de l'expérience.....	87
4.3.	Résultats	91
4.3.1.	Mesures objectives.....	91
4.3.2.	Mesures subjectives	96
4.4.	Conclusions.....	116
5.	Conclusions et perspectives	119
	Bibliographie	123
	ANNEXE A : Consignes et informations de l'expérience de longue durée.....	133
	ANNEXE B: Résultats supplémentaires pour l'expérience de longue durée.....	145
	Questionnaire GABO	145
	Questionnaire de Thayer et somnolence.....	149
	Fatigue mentale – Effet du terme croisé « conditions sonores # moment de la journée	154
	Modèles et analyses GAM supplémentaires réalisés avec R	156

Liste des figures

Figure 2.1. Relation entre le STI et le score d'intelligibilité pour trois types d'énoncés différents : liste de mots phonétiquement équilibrées (PB-words), syllabes consonne-voyelle-consonne (CVC_{EQB}) et phrases entières (Sentences). Cette figure est tirée de la norme IEC-60268-16, 2011.	30
Figure 2.2. Le décrétement de performance (DP) en fonction du STI pour les expériences conduites en laboratoire et pour le modèle prédictif (en trait plein).....	33
Figure 2.3. Force de fluctuation en fonction du niveau global d'un signal de bruit blanc modulé en amplitude à une fréquence de 4 Hz.	36
Figure 2.4. Représentation d'un signal audio en fonction du temps. En bleu est représenté le signal temporel avec son amplitude sur l'axe de gauche, en noir est représenté le $LeqA_{125ms}$ de ce signal audio, en rouge (trait plein) est représenté la valeur du niveau moyen du signal ($LeqA$) et en pointillés est représentée la valeur du $L_{90,125ms}$ du signal. L'axe des valeurs du niveau sonore est donné à droite de la figure.....	38
Figure 2.5. Classification des espaces ouverts de la base de données MEPAS. (haut gauche) bleu : les centres d'appels, (haut droite) rouge : les plateaux collaboratifs, (bas gauche) vert : le plateau administratif, (bas droite) noir : les salles d'accueil du public	40
Figure 2.6. $MeqA_{125ms}$ en fonction du STI pour des signaux composés de parole intelligible et d'un bruit blanc stationnaire. Cette courbe est obtenue en faisant varier le rapport signal sur bruit de -15 à 15 dB.....	41
Figure 2.7. Schéma synthétique des interactions entre la charge intrinsèque, la charge externe, les ressources disponibles et la charge essentielle (Galy, 2017).	47
Figure 3.1. Schéma de la cabine d'audiométrie utilisée pour l'expérience (vue de dessus).....	51
Figure 3.2. Spectre d'un bruit rose à la position d'écoute avant (gauche) et après (droite) l'égalisation.....	52
Figure 3.3. Questionnaire de début d'expérience.	54

Figure 3.4. Les trois étapes de la tâche de STROOP présentés à chaque sujet. Dans cet exemple illustré, la réponse correcte pour les trois étapes est 'VERT'	55
Figure 3.5. Procédure de création des signaux de l'expérience.	58
Figure 3.6. Carré latin (5x5) avant (gauche) et après (droite) la permutation des colonnes 1,2 et 4,5.	59
Figure 3.7. Schéma de la procédure pour chaque phase (chaque condition sonore)	60
Figure 3.8. Schéma de la procédure totale de l'expérience	60
Figure 3.9. Décrément de performance en fonction du STI, accompagné de l'intervalle de confiance à 95%.	62
Figure 3.10. Augmentation de NASA-RTLX en fonction du STI	63
Figure 3.11. Scores de gêne sonore ressentie en fonction du STI	64
Figure 3.12. La note de vigilance en fonction de l'ordre de passage du questionnaire de Thayer	65
Figure 3.13. Distributions des valeurs de performance en fonction des deux coûts cognitifs pour toutes conditions sonores confondues.	66
Figure 3.14. Classification hiérarchique des participants	67
Figure 3.15. La performance du coût cognitif élevé en fonction des conditions sonores pour les deux groupes de participants.....	68
Figure 3.16. Décrément de performance en fonction du STI pour le premier groupe (en noir) et le deuxième groupe (en gris).....	69
Figure 3.17. La note de vigilance en fonction de l'ordre du passage du questionnaire de Thayer pour les deux groupes formés à partir de la classification hiérarchique	70
Figure 4.1. Banc expérimental (à gauche, vue sur la marguerite depuis l'entrée de la salle semi-anéchoïque. A droite, vue sur l'entrée et le poste de l'expérimentateur : partie entourée sur la droite de la photo)	77

Figure 4.2. Spectres en bande d'octave mesurés aux six postes de la marguerite et spectre normalisé (ISO 3382-3, 2012) avec un niveau acoustique global de 55 dB(A).....	78
Figure 4.3. Spectres en bandes d'octave du bruit de ventilation mesurés aux six positions du banc expérimental (niveau global de 40 dB(A)).....	79
Figure 4.4. Spectres en bandes d'octave du bruit stationnaire mesurés aux six positions de la marguerite pour un niveau acoustique moyen de 55 dB(A)	80
Figure 4.5. Création du signal audio de la condition de parole intelligible.	81
Figure 4.6. Création de la troisième condition sonore en utilisant soit, la méthode classique de calcul de l'enveloppe soit, la méthode du Leq_{40ms}	82
Figure 4.7. Distributions de la différence point par point entre le $MeqA_{125ms}$ du bruit modulé et le $MeqA_{125ms}$ de la condition de parole, pour la méthode de l'enveloppe obtenue par filtrage passe-bas (noir) et pour la méthode du Leq court.....	83
Figure 4.8. Schéma du protocole de la journée type.....	90
Figure 4.9. Le DP pour la parole et le bruit modulé en début (bleu) et fin (rouge) de journée.	92
Figure 4.10. Performance lors de la tâche de sériation en fonction des trois conditions sonores. En bleu est représentée la performance pour la tâche du matin et en rouge celle pour la tâche du soir.	93
Figure 4.11. Moyennes et intervalles de confiance du nombre de mots écrits lors de la revue de presse en fonction des conditions sonores.	96
Figure 4.12. Perception de l'environnement sonore (moyennes et intervalles de confiance) selon les dimensions calme-bruyant (en haut) et gêne sonore (en bas) en fonction des conditions sonores.....	97
Figure 4.13. Fatigue sonore (moyennes et intervalles de confiance) en fonction du moment de la journée (en haut) et des conditions sonores (en bas).....	98
Figure 4.14. Fatigue générale (haut) et fatigue mentale (bas) en fonction du moment de la journée, pour chaque condition sonore.	101
Figure 4.15. Ressources disponibles RI (haut) et charge externe CE (base) en fonction du moment de la journée pour chaque condition sonore.	103

Figure 4.16. Charge intrinsèque à la tâche (haut) et charge essentielle (bas) en fonction du moment de la journée, pour chaque condition sonore.	104
Figure 4.17. Les RI en fonction de l'interaction vigilance-tension (en haut à gauche), de la fatigue générale (en haut à droite) et de la somnolence (bas).	109
Figure 4.18. La CE en fonction des trois dimensions d'évaluation subjective de l'environnement sonore : fatigue sonore (en haut à gauche), gêne sonore (en haut à droite) et « calme-bruyant » (bas)	110
Figure 4.19. La CI en fonction de l'interaction performances de mémorisation (matin) – conditions sonores	111
Figure 4.20. La CP en fonction de l'interaction RI-CE (à gauche) et de la CI (à droite).....	112
Figure 4.21. Le nombre de mots écrits en fonction de la CP (à gauche) et des performances de mémorisation le matin (à droite)	113
Figure 4.22. Schéma explicatif du modèle ICA établie pour l'expérience à partir des modèles GAM	115
Figure 0.1. Répartition des données du score de la satisfaction globale pour toutes les conditions sonores.	145
Figure 0.2. Score moyen de satisfaction globale et intervalle de confiance à 95 % en fonction des conditions sonores	146
Figure 0.3. Scores moyens de confort (haut) et de privacité (bas) et intervalle de confiance à 95 %	147
Figure 0.4. Moyennes accompagnées des intervalles de confiance à 95 % du score de concentration en fonction des conditions sonores	148
Figure 0.5. Tension (haut) et vigilance (bas) en fonction du moment de la journée, pour chaque condition sonore.	150
Figure 0.6. Somnolence en fonction du moment de la journée, pour chaque condition sonore.	151
Figure 0.7. Fatigue générale	157

Figure 0.8. Fatigue mentale	158
Figure 0.9. Tension.....	160
Figure 0.10. Vigilance.....	161
Figure 0.11. Somnolence	163
Figure 0.12. Gêne soore.....	166
Figure 0.13. Calme-bruyant	167
Figure 0.14. Fatigue sonore	168

Liste des tableaux

Tableau 2.1 Répartition en fonction du type d'espace ouvert des entreprises figurant dans la base de données utilisée pour cette étude et des questionnaires recueillis.	39
Tableau 4.1. Niveaux globaux mesurés aux six postes de la marguerite pour le spectre LTASS et pour celui du bruit de la ventilation.....	79
Tableau 4.2. Répartition des participants selon l'ordre de passage des conditions sonores.....	87
Tableau 4.3. Tests post-hoc de Tukey pour les indicateurs d'évaluation subjective de l'environnement sonore.....	99
Tableau 4.4. Test post-hoc de Tukey pour la fatigue générale et la fatigue mentale	102
Tableau 4.5. Résultats du test post-hoc de Tukey pour les indicateurs d'évaluation de la charge mentale de travail et du nombre de mots écrits dans les synthèses d'articles.	107
Tableau 7. Résultats du test post-hoc de Tukey pour les scores de privacité et de concentration. .	149
Tableau 8. Résultats du test post-hoc de Tukey pour les variables psychologiques.	152

1. Introduction

Cette thèse s'inscrit dans le cadre de l'étude de l'effet des nuisances sonores sur les personnes travaillant dans les bureaux ouverts. Elle répond à l'expression de préoccupations, en particulier de l'Institut National de Recherche et de Sécurité (INRS), pour la prévention des risques professionnels. La problématique est nouvelle par rapport à celle, plus ancienne, de l'exposition au bruit des travailleurs. En effet, le niveau de bruit dans un bureau ouvert est souvent en dessous des limites réglementaires (on ne parle pas ici du cas particulier des niveaux sous casque dans les centres d'appels téléphoniques par exemple, qui peuvent en l'absence de limiteur atteindre des niveaux supérieurs à ceux exigés par la réglementation). Néanmoins, de nombreux sondages indiquent que les occupants de tels locaux se plaignent de l'ambiance sonore (Amstutz, Kündig, & Monn, 2010; Pierrette, Parizet, Chevret, & Chatillon, 2015). A ces niveaux non lésionnels, on parle d'effets extra-auditifs du bruit qui se manifestent par de la gêne sonore ou des pertes de performances à réaliser une tâche particulière en présence du bruit et qui peuvent se manifester à terme par de la fatigue, une perte de sommeil, du stress, etc.

Les travaux de thèse ont été menés à l'INRS dans le cadre d'une collaboration avec l'Institut National des Sciences Appliquées (INSA Lyon) et l'Université Nice Sophia-Antipolis. Cette collaboration vise à caractériser les effets psychologiques dus au bruit lors d'activités de travail en bureau ouvert. Les études menées dans le cadre de cette collaboration portent sur deux axes principaux :

- 1 – identifier les effets psychologiques de différents types de bruit sur les salariés des bureaux ouverts,
- 2 – valider l'existence de ces effets au travers d'expérimentations en laboratoire.

Pour contribuer à la prévention des risques professionnels et à la maîtrise des nuisances sonores dans les bureaux ouverts, deux domaines scientifiques différents sont mis en relation au sein de cette collaboration, la psychologie ergonomique et l'acoustique des locaux.

Un bureau ouvert est défini comme un espace de travail conçu pour accueillir plus de cinq personnes sans séparations complètes entre les postes (AFNOR, 2016). L'espace ouvert, comme espace de travail, connaît un développement important depuis plusieurs décennies. Aujourd'hui, d'après les chiffres de l'INSEE (consulter la page web <https://www.insee.fr/fr/accueil>), parmi les 20 millions de personnes qui travaillent dans le secteur tertiaire, 1/3 d'entre elles exercent dans un bureau ouvert. Des arguments de « convivialité » et « d'adaptabilité » sont souvent utilisés pour décrire l'organisation en « open-space ». Cependant, la motivation principale pour la conception de ces espaces de travail est souvent la

réduction des coûts de fabrication et d'aménagement des locaux ainsi que le gain de surface. Ces espaces sont donc avantageux pour l'employeur d'un point de vue économique et, dans le même temps, ils sont censés faciliter le travail en équipe en favorisant la communication entre les salariés.

Le bruit est une source majeure de gêne pour les employés. Il semble que cette gêne ne provienne pas uniquement du niveau global du bruit mais que la structure de ce dernier (temporelle et/ou fréquentielle) soit déterminante. Une enquête suisse montre que malgré un niveau global plutôt faible du point de vue de la réglementation (< 60 dB(A)) les salariés se plaignent du bruit (Amstutz et al., 2010). Plusieurs études (Perrin Jegen & Chevret, 2016; Pierrette et al., 2015; Sundstrom, Town, Rice, Osborn, & Brill, 1994) confirment ce résultat et indiquent que le signal de parole généré dans les bureaux ouverts est responsable d'une gêne majeure par rapport à d'autres types de bruit (bruits de machine, sonneries de téléphone, passage de personnes *etc.*). Par ailleurs, la parole devient de plus en plus gênante lorsqu'elle est de plus en plus intelligible.

La question qui se pose est celle de l'impact du bruit de parole sur deux paramètres :

- 1 – les performances des salariés en entreprise,
- 2 – les états psychologiques des salariés.

Dans le cas du premier paramètre, il est difficile de mesurer les performances des salariés au sein de bureaux ouverts, quel que soit l'environnement de travail. Cela nécessiterait une analyse d'activité complexe puisque les tâches de travail varient d'un salarié à l'autre au sein d'un même espace, selon la fonction qu'il occupe.

Que ce soit pour les performances, ou pour les états psychologiques, l'évaluation sur le terrain est très difficile à conduire, ceci pour plusieurs raisons. D'abord, elle dépend de l'activité exercée par les salariés. Or, celle-ci dépend de l'activité de l'entreprise elle-même (centre d'appels, plateau collaboratif, plateau non collaboratif, hall d'accueil du public ; voir la typologie décrite dans la norme NF S 31-199) ; mais peut aussi provenir du fait qu'au sein de la même entreprise, plusieurs activités peuvent coexister. Une analyse de l'activité préalable est donc nécessaire avant toute évaluation. Ensuite, il est très difficile sur le terrain d'extraire une valeur représentative de l'environnement sonore car il dépend à la fois du moment de la journée et du lieu sur le plateau. Enfin, il est très difficile de maintenir un nombre suffisamment important de sujets sur la totalité d'une observation qui peut durer plusieurs heures voire plusieurs jours, en raison des contraintes de l'activité. Spécifiquement, l'évaluation des performances sur le terrain a ceci de complexe de devoir s'adapter aux tâches demandées par l'entreprise. L'évaluation des états psychologiques quant à elle nécessite la mise en place de questionnaires spécifiques souvent lourds à déployer sur site. Cependant, des versions informatisées des questionnaires permettent de simplifier la mise en œuvre et de réduire les temps de passation et de

dépouillement. Ces questionnaires consistent à mesurer principalement des facteurs psychologiques (comme la charge mentale de travail, la vigilance, la tension, l'état de somnolence) lors d'une journée de travail ainsi que des facteurs de perception de l'environnement sonore (comme la gêne et la fatigue) provenant du bruit. Cette démarche est souvent celle utilisée par l'INRS lors de ses interventions en entreprise à la demande des CARSAT.

En raison de toutes ces difficultés, cette thèse s'inscrit dans la continuité des travaux menés par l'INRS et plus particulièrement dans le deuxième axe de la collaboration, qui cherche à valider l'existence d'effets psychologiques liés au bruit au travers d'expériences en laboratoire. Les facteurs psychologiques y sont testés dans des conditions expérimentales où l'environnement sonore est totalement contrôlé. De ce fait, les variations des facteurs psychologiques sont étudiées et validées en fonction des variations des indicateurs acoustiques.

Les travaux de thèse visent ainsi l'étude de l'impact du bruit de parole sur des facteurs psychologiques dans des conditions contrôlées.

Aujourd'hui, plusieurs études démontrent un effet du bruit de parole sur les participants lors d'expériences en laboratoire (Banbury & Berry, 1998; Hongisto, 2005; Zimmer, Ghani, & Ellermeier, 2008). Ces effets sont mesurés soit au travers de performances lors de tâches particulières (tâche de mémoire à court-terme, tâche arithmétique etc.), soit au travers de mesures subjectives de la gêne sonore (par exemple, en posant la question suivante aux participants : « Dans quelle mesure l'environnement sonore vous a-t-il gêné ? » (Zimmer et al., 2008). Il s'avère que la parole intelligible a un impact plus important sur les performances réalisées lors des expériences. Ainsi, (Boyce, 1974) montre que le brouhaha ambiant devient plus perturbant lorsqu'il contient des extraits de parole intelligible. Ces expériences sont réalisées, en majorité, à partir de tâches de mémoire à court-terme. Il semblerait que parmi les différentes études en laboratoire, les tâches de mémoire à court-terme soient les plus utilisées pour observer un effet des variations d'intelligibilité de la parole sur les performances (Brocolini, Parizet, & Chevret, 2016; Ebissou, Parizet, & Chevret, 2015; Ellermeier & Hellbrück, 1998; Haka et al., 2009; Jahncke, Hongisto, & Virjonen, 2013; Liebl, Assfalg, & Schlittmeier, 2016; S. J. Schlittmeier, J. Hellbrück, R. Thaden, & M. Vorländer, 2008). L'intérêt de ces tâches, décrit par les auteurs, est d'étudier précisément l'effet de l'intelligibilité, représentée par l'indicateur classique, le Speech Transmission Index (STI), sur un processus cognitif classique comme celui de la mémoire à court terme. Les tâches sont de courte durée (environ dix minutes par condition sonore), ce qui permet d'observer les effets immédiats du bruit sur la mémoire à court-terme. En revanche, ces expériences ne sont pas représentatives de la réalité de l'activité au sein de bureaux ouverts. La durée d'exposition par condition sonore est courte et la tâche réalisée par les participants est très différente d'un travail de

bureau. Il est donc difficile d'extrapoler les résultats de telles expériences à la vie courante des entreprises. La thèse propose donc une voie vers une nouvelle méthode d'évaluation de l'impact du bruit de parole à partir d'une expérience garantissant une validité écologique plus importante.

La thèse est divisée en quatre chapitres.

Le premier chapitre présente l'état de l'art mobilisé sur les expériences en laboratoire ayant pour but d'étudier les effets du bruit sur des personnes effectuant un travail. Cette partie donne un aperçu des indicateurs acoustiques utilisés dans la littérature pour relier les variations de l'intelligibilité de la parole et les effets du bruit sur le travail des participants. Trois indicateurs acoustiques sont présentés, deux d'entre eux seront utilisés lors des expériences conduites dans le cadre de ce travail. Ensuite, sont présentées des expériences issues de la littérature étudiant les variations d'intelligibilité de la parole et les performances réalisées lors de tâches de mémoire à court-terme – tâches dites de courte durée. Enfin, la dernière partie de ce chapitre décrit les outils nécessaires pour élaborer une expérience plus écologiquement valide.

Le deuxième chapitre décrit la première expérience réalisée, qui utilisait un protocole classique (tâche de sériation et présentation de bruits de parole d'intelligibilité variable). L'objectif était d'une part de tester des situations d'intelligibilité forte, car la littérature présentait une grande variabilité de résultats dans ces situations. D'autre part, cette expérience était l'occasion de tester si la grande variabilité interindividuelle classiquement rencontrée dans les résultats antérieurs [(Ebissou et al., 2015) par exemple] pouvait être réduite par une adaptation de la tâche aux capacités individuelles de mémoire à court-terme.

Le troisième chapitre décrit une expérimentation menée dans des conditions écologiques plus proches de la réalité des bureaux ouverts : une durée d'exposition aux bruits et une tâche expérimentale représentative de celles d'une journée de travail. Cette expérience avait pour but d'évaluer si l'effet particulier de la parole (décrit par les occupants lors des enquêtes) peut se mesurer en laboratoire dans de telles conditions.

Le dernier chapitre propose une conclusion générale des résultats des deux expériences réalisées dans ce travail de thèse. Les apports et les limites des deux expériences conduites lors de la thèse y sont décrits dans le but d'améliorer les protocoles d'expériences futures. Enfin, une méthodologie d'évaluation des effets du bruit de parole pour de nouvelles expérimentations est proposée.

2. Etat de l'art

Les effets du bruit de parole sur les personnes effectuant une tâche de travail dans des conditions de laboratoire sont mesurés principalement selon deux façons : objective et subjective. La mesure objective consiste à évaluer les performances réalisées par les participants lors d'une tâche. Cette tâche se présente souvent sous forme d'un test et la performance est mesurée à partir du nombre d'erreurs commises par le participant lors du test. Par exemple, pour une tâche d'arithmétique, l'indicateur de performance sera le nombre d'erreurs commises lors des opérations arithmétiques. La performance est donc une mesure quantitative qui dépend directement des capacités du participant à effectuer la tâche. Pour cette raison, la mesure est appelée objective. La mesure subjective, pour sa part, consiste à interroger les participants en utilisant des questionnaires, psychologiques pour la plupart, validés et tirés de la littérature. Ces questionnaires vont permettre de mesurer certains facteurs ressentis par le participant et liés à son état psychologique, à la charge mentale de travail et à la perception de l'environnement sonore (si cet environnement est gênant, fatigant etc.).

Ces deux types de mesure sont en général réalisés dans plusieurs ambiances sonores, dont l'une va servir de référence (souvent, il s'agit de silence). Les mesures étant très variables individuellement, la différence entre les mesures réalisées dans une condition sonore particulière et la référence seront utilisées pour estimer l'effet de cette condition sonore.

Ce chapitre va présenter les modèles nécessaires pour pouvoir réaliser la partie expérimentale de cette thèse, constituée de deux expériences, une de courte durée et une de longue durée.

2.1. Evaluation des effets de l'intelligibilité de la parole sur les tâches de sériation

Les employés en bureau ouvert sont amenés à réaliser lors de leurs journées de travail différentes tâches qui demandent un effort mental plus ou moins important. La plupart de ces tâches sollicitent la mémoire, particulièrement la mémoire de travail. La mémoire de travail renvoie à la définition d'une partie du cerveau humain qui consiste à stocker de l'information et ensuite à la manipuler pour effectuer une tâche complexe comme le langage, la compréhension, l'apprentissage et le raisonnement (Baddeley, 1992). Cette mémoire est mise en œuvre dans un grand nombre d'activités cognitives quotidiennes, pendant un travail réalisé (Rosenbaum, Cohen, Jax, Weiss, & Van Der Wel, 2007). Il est alors apparu que la parole peut réduire les performances réalisées lors d'une tâche mobilisant la

mémoire de travail. Ceci a notamment été mis en évidence en laboratoire pour des tâches de sériation, consistant à mémoriser une série d'items (chiffres ou mots) apparaissant brièvement sur un écran (Colle & Welsh, 1976). Cet effet a été appelé ISE ('Irrelevant Speech Effect') (Salamé & Baddeley, 1982). Ce phénomène a fait l'objet d'études pendant plusieurs années pour essayer de comprendre les caractéristiques nuisibles du bruit et les mécanismes de la mémoire impactés par ce bruit indésirable. Par exemple, Salamé et Baddeley 1989 (Salamé & Baddeley, 1989) ont étudié l'importance de la présence de la parole dans la musique lors de la réalisation d'une tâche de sériation. Ils ont conclu que l'effet de la musique avec une voix est significativement différent de celui de la musique instrumentale (sans présence de voix). Jones et Macken (Jones & Macken, 1993) comparent les effets de la parole et ceux de sons à fréquence pure générés par un synthétiseur. Lors de l'étude, ils concluent que les sons à fréquence pure produisent un effet équivalent à celui des syllabes. En complément des résultats de cette étude, Lecompte et coll. (LeCompte, Neely, & Wilson, 1997) montrent que l'ISE dû à la parole ayant un sens sémantique est plus grand que l'ISE dû à des sons tonaux d'une fréquence donnée (245 Hz, 490 Hz, 980 Hz et 1960 Hz), des syllabes et du silence lors d'une tâche de sériation.

L'hypothèse du changement d'état ('changing state hypothesis') apparaît dans la littérature pour donner une explication de l'existence de l'ISE (Jones, Macken, & Murray, 1993; Jones, Madden, & Miles, 1992). Elle établit que ce n'est pas spécifiquement la parole qui est le principal facteur de l'ISE, mais, plutôt des caractéristiques physiques du bruit comme le spectre, l'enveloppe, le tempo, le rythme et la segmentation syllabique. Selon cette hypothèse, il existe un « tableau » de mémoire d'audition où les « objets » (nom donné par Jones et coll.) auditifs ou visuels sont automatiquement enregistrés comme du signal auditif. Pour accéder à cette mémoire, l'objet visuel passe par un processus de répétition subvocale. Ces objets enregistrés ont des liens particuliers entre eux selon l'ordre de présentation. La dissemblance des variations acoustiques entre deux objets consécutifs, appelée le « changement d'état », est la cause de la gêne lors de la tâche de sériation. Ainsi, le fait de devoir inhiber l'information auditive apporte également une charge supplémentaire de travail (Gisselgård, Petersson, & Ingvar, 2004). Pour vérifier cette hypothèse, plusieurs études ont été conduites en laboratoire. (Jones et al., 1993) montrent que lorsque le bruit est stationnaire cet effet perturbateur est minime. Quand le bruit est segmenté à un rythme non régulier et avec des variations rapides en amplitude et en fréquence propres à la parole, un phénomène de changement d'état de l'information auditive apparaît. Ce changement d'état serait alors à l'origine d'un effet perturbateur plus important. (Little, Martin, & Thomson, 2010) ont conduit une étude qui compare l'effet de la parole à celui d'un bruit ayant les mêmes caractéristiques acoustiques que les signaux de parole en utilisant une méthode proposée par (Schroeder, 1968). Cette méthode permet d'avoir un signal totalement inintelligible tout en conservant l'enveloppe, le profil spectral, le tempo, le rythme et la syllabisation du signal de parole d'origine. Les

auteurs ont conclu que l'ISE causé par des signaux de parole est plus important que l'ISE causé par le bruit sur la tâche de sériation. De plus, (Banbury & Berry, 1998) ont conduit une expérience où les bruits étaient des enregistrements de bruits de bureaux ouverts. Les résultats ont montré que les conditions sonores contenant de la parole intelligible perturbent plus les processus de mémoire que la condition contenant seulement des bruits de bureau (bruit d'imprimante, sonneries de téléphone, bruits de clavier d'ordinateur et bruits de fax). Ils expliquent que l'effet de cette dernière condition n'est pas différent de celui de silence ou d'un bruit stationnaire sur les processus de mémoire.

Etant donné que la parole impacte la mémoire plus que d'autres types de bruit, son intelligibilité va jouer un rôle gênant (Ellermeier & Hellbruck, 1998; Hongisto, 2005). La partie suivante décrit les indicateurs d'intelligibilité utilisés dans la littérature. Cela permet de faire un lien entre la variation d'intelligibilité et l'ISE.

2.1.1. Evaluation de l'intelligibilité de la parole

L'intelligibilité de la parole peut être évaluée à partir d'indices selon deux approches légèrement différentes. À l'origine de ces approches est l'indice d'articulation (AI) de French et Steinberg 1947 (French & Steinberg, 1947). Les deux approches calculent un score d'intelligibilité entre 0 et 1 en se basant sur un rapport signal sur bruit. Pour ce faire les deux sources (bruit et parole) sont connues.

Le premier indicateur d'intelligibilité est proposé par la norme américaine ANSI S3.5 (ANSI-S-3.5, 1997) et appelé SII ('Speech Intelligibility Index'). Cet indicateur consiste à calculer l'intelligibilité d'un signal de parole à l'oreille de l'auditeur. Il prend en compte le masquage fréquentiel du niveau dans chaque bande d'octave du signal intelligible par le bruit ambiant.

Le deuxième indicateur repose sur le calcul des pertes par transmission du signal de parole. Cet indicateur nommé STI ('Speech Transmission Index') a été développé par (H. J. M. Steeneken & Houtgast, 1980) et il est intégré dans la norme IEC 60268-16, 2011 (IEC, 2011). Son principal avantage est qu'il est évalué au travers des fonctions de transfert de modulations qui prennent en compte des paramètres de la salle dans laquelle le signal cible est transmis. Il est calculé de la façon suivante :

$$STI = \sum_{k=1}^n w_k TI_k,$$

où w_k est un facteur de pondération de chaque bande d'octave k et TI_k est l'indice de transmission qui traduit les pertes des modulations du signal lorsqu'il est transmis de la source à l'oreille de l'auditeur. Cet indice de transmission est calculé pour chaque bande d'octave et s'écrit:

$$TI_{k,i} = \frac{SNR_{k,i}^{app} + 15}{30}$$

$SNR_{k,i}^{app}$ est le rapport signal sur bruit à l'oreille de l'auditeur, dit signal sur bruit apparent. Ce rapport est calculé dans chaque bande d'octave k et pour chaque fréquence de modulation pour la bande tiers d'octave i comprise entre 0,63 Hz et 12,5 Hz. Il est limité entre -15 et +15 dB, car le signal de parole est totalement intelligible lorsque le rapport signal à bruit est supérieur à 15 dB et impossible à déchiffrer quand ce rapport est inférieur à -15 dB. Le fait d'ajouter 15 et de normaliser par 30 permet d'avoir des scores de $TI_{k,i}$ compris entre 0 et 1.

Le rapport signal sur bruit apparent, $SNR_{k,i}^{app}$, dépend de la fonction de transfert de modulation $m_{k,i}$. Il s'écrit:

$$SNR_{k,i}^{app} = 10 \times \log_{10} \left(\frac{m_{k,i}}{1 - m_{k,i}} \right)$$

Cette fonction de transfert prend en compte tous les facteurs qui favorisent les pertes de modulation du signal cible. Dans le cas où ce signal se propage dans un local en présence de bruit de fond, la fonction de transfert de modulation peut s'écrire de la façon suivante :

$$m_{k,i} = m'_k \times m''_k \times m'''_{k,i}$$

m'_k est la fonction de transfert de modulation qui traduit les effets du bruit ambiant et qui ne dépend pas de la fréquence de modulation. Elle s'exprime comme :

$$m'_k = \left(1 + 10^{-SNR_k/10} \right)^{-1}$$

m''_k est la fonction de transfert de modulation qui dépend du masquage fréquentiel et du seuil de l'audition. Elle s'écrit :

$$m''_k = \frac{I_k}{I_k + I_{rs,k} + I_{AM,k}}$$

Où I_k est l'intensité du signal dans chaque bande d'octave, $I_{rs,k}$ est l'intensité du seuil de l'audition et $I_{AM,k}$ est l'intensité qui tient compte du masquage fréquentiel et qui est définie comme :

$$I_{AM,k} = I_{k-1} \times AMF$$

AMF est un facteur d'atténuation dû au masquage auditif d'une bande d'octave par sa voisine supérieure.

Et la troisième fonction de transfert de modulation $m'''_{k,i}$ s'écrit comme :

$$m''_{k,j} = \frac{\left| \int_0^\infty h_k^2(t) e^{-(2j\pi F_i t)} dt \right|}{\int_0^\infty h_k^2(t) dt}$$

Où F_i est la fréquence de modulation pour chaque bande tiers d'octave comprise entre 0,63 Hz et 12,5 Hz et $h_k(t)$ est la réponse impulsionnelle du local filtrée dans la bande de fréquence k (Houtgast, Steeneken, & Plomp, 1980). Dans le cas où seule la réverbération du local dégrade cette transmission du signal, ce nombre peut être calculé directement à partir du temps de réverbération T_r^k dans la bande k :

$$m'''_{k,i} = \left(1 + \left(\frac{2\pi F_i T_r^k}{13,8} \right)^2 \right)^{-1/2}$$

Le STI n'est défini que pour un bruit ambiant stationnaire. Pour un signal de parole en présence d'un bruit de fond fluctuant tel qu'on peut en trouver dans les open-spaces, ils existent des approches plus sophistiquées comme le Silt (Rhbergen 2005 (Rhebergen & Versfeld, 2005)), le STIt (Ebissou 2013 (Ebissou, 2013), Brocolini 2016 (Brocolini et al., 2016)) et le STIm (Chevret 2016 (P. Chevret, 2016)). Pour la présente étude, nous n'étudierons pas les effets des fluctuations du bruit ambiant. Par conséquent, un calcul classique du STI suffira.

La figure 2.1 montre la relation entre le STI calculé et le score d'intelligibilité mesuré au travers des expériences en laboratoire (figure tirée de (IEC-60268-16, 2011; H. J. Steeneken & Houtgast, 2002)). Les trois courbes ont été obtenues pour des listes de mots phonétiquement équilibrés (PB-words), des syllabes consonne-voyelle-consonne (CVC_{EQB}) et des phrases entières (Sentences). La courbe pour les énoncés CVC_{EQB} est proche de la linéarité. En revanche pour les phrases entières, elle a un comportement différent selon deux plages : lorsque le STI varie entre 0,3 et 0,7 le score s'améliore rapidement. Pour un auditeur attentif ce discours reste compréhensible même s'il n'entend pas l'intégralité du discours. L'auditeur se sert de l'information intelligible pour reconstituer l'information manquante. Pour un STI > 0,7, l'intelligibilité du discours est considérée comme excellente.

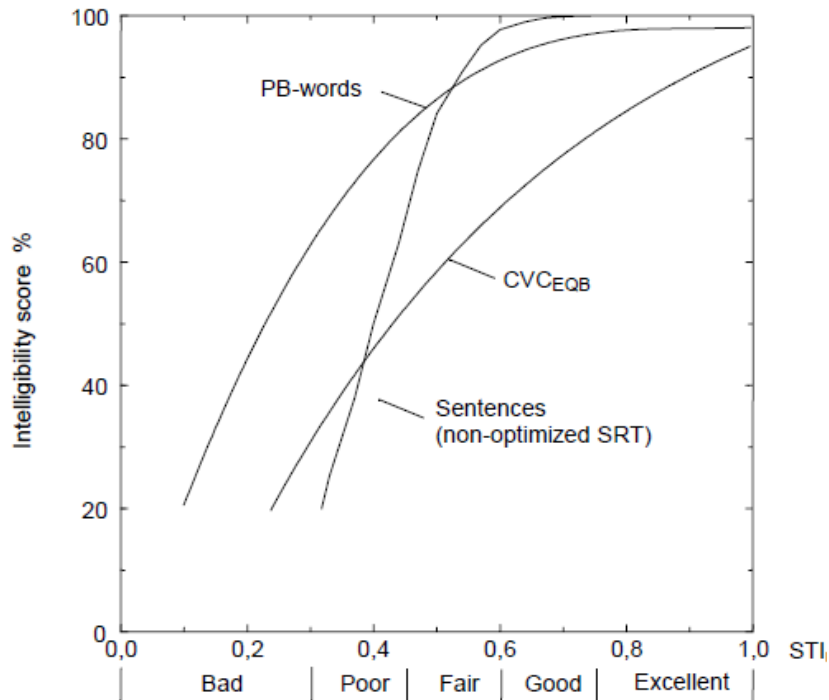


Figure 2.1. Relation entre le STI et le score d'intelligibilité pour trois types d'énoncés différents : liste de mots phonétiquement équilibrés (PB-words), syllabes consonne-voyelle-consonne (CVC_{EQB}) et phrases entières (Sentences). Cette figure est tirée de la norme IEC-60268-16, 2011.

2.1.2. Mesure de l'ISE

2.1.2.1. Expériences en laboratoire

Pour mesurer l'ISE en fonction de l'intelligibilité, plusieurs études ont été conduites en laboratoire. Pour toutes ces études, la mesure de l'ISE est faite au travers d'une tâche de mémoire de sériation dans différentes conditions de bruit. Ces conditions sont caractérisées par l'intelligibilité de la parole qui est estimée par un indicateur (STI le plus souvent). Les performances des participants et parfois la gêne qu'ils ressentent sont mesurées. Une condition de contrôle, généralement le silence, est toujours présente, ceci afin de pouvoir normaliser la mesure d'ISE.

(Hongisto, 2005) propose un modèle reliant la baisse de performance lors d'une tâche de mémoire de sériation et le STI en se basant sur une revue de la littérature faite pendant ces travaux. Pour ce faire, il normalise les performances (exprimer en %) obtenues dans les conditions de bruit par la performance obtenue dans la condition de contrôle, généralement le silence, selon la relation suivante:

$$DP = Perf_{contrôle} - Perf_{bruit}$$

Où DP signifie le décrement de performance. Hongisto calcule ce dernier pour tous les résultats trouvés dans la littérature puis propose un modèle prédictif qui relie le STI et le DP comme suit :

$$DP = \frac{-7}{1 + \exp\left(\frac{STI - 0,4}{0,06}\right)} + 7 \quad [\%]$$

Cette relation, affichée sur la figure 2.2 en trait plein, indique que pour des valeurs de STI entre 0,25 et 0,7 le DP est très sensible à l'intelligibilité. Au-delà de cette valeur, le DP est quasi-constant à 7%. Selon Hongisto, cette valeur plafond à 7% est définie à partir de la revue de littérature présentée dans son étude. Elle peut être différente selon le type de tâches considéré pour l'expérience. Une synthèse des résultats de ces études est présentée ci-dessous.

2.1.2.1.1. Résultats des expériences précédentes

(Ellermeier & Hellbrück, 1998) ont été les premiers à conduire des expériences sur l'ISE en lien avec l'intelligibilité de la parole. Pour les deux expériences 2a et 2b de leur étude, 5 conditions sonores ont été testées en faisant varier l'intelligibilité (STI entre 0,2 et 1), la parole étant mélangée à du bruit rose. Dans tous les cas, le niveau acoustique du signal total était fixé à 65 dB(A). La tâche consistait à mémoriser des listes de chiffres et les restituer directement après chaque liste. Pour les deux expériences, les analyses statistiques ont montré un effet significatif négatif de l'augmentation de l'intelligibilité sur le DP qui varie entre 0% et 12 % pour l'expérience 2a et entre 0% et 7% pour l'expérience 2b.

(S. J. Schlittmeier et al., 2008), de la même manière que Ellermeier et Hellbrück (1998) ont mis en place une expérience comprenant une tâche de mémorisation de chiffres pour un indice d'intelligibilité qui variait entre 0,3 et 0,8. 3 conditions de bruit ont été testées. Pour la première condition (STI = 0,8), le signal de parole était très intelligible et pour les deux autres conditions l'intelligibilité était soit 'bonne' (STI = 0,6) soit 'mauvaise' (STI = 0,3). La première condition avait un niveau de 55 dB(A) et les deux autres avaient un niveau de 35 dB(A). 35 dB (A) représentent pour Schlittmeier et coll. le niveau adéquat du bruit venant du bureau voisin. Schlittmeier et coll. ont conclu que, comme pour les autres expériences précédentes, il y a un effet de la variation du STI sur la baisse des performances. Un aspect original de cette expérience était la mesure subjective de la gêne sonore au travers d'une question simple : « Avez-vous été gêné par le bruit ? ». Dans cette expérience, le fait d'augmenter l'indice d'intelligibilité avait un effet significatif positif sur la mesure subjective de la gêne.

(Liebl et al., 2016) ont utilisé une tâche de mémorisation de chiffres de 1 à 9, répétée pour des conditions de STI variant entre 0,37 et 0,8. Le niveau sonore des signaux à la position du participant était

de 55 dB(A). Comme dans l'étude de (S. J. Schlittmeier et al., 2008), Liebl et coll. évaluent la gêne ressentie. Les résultats montrent une différence significative du DP entre la condition de STI=0,8 et toutes les autres conditions. Ce résultat est retrouvé également pour la gêne sonore ressentie mesurée au travers la question : « Avez-vous été gêné par le bruit ? »..

(Haka et al., 2009) ont réalisé, comme précédemment, une expérience de mémoire des chiffres. Cette fois-ci la valeur du STI variait entre 0,1 et 0,65. Pour créer ces conditions ils ont utilisé un signal de parole de radio auquel était superposé un bruit rose. Le signal de parole a été coupé en signaux plus courts ne contenant qu'une phrase. Les analyses statistiques ont montré un effet significatif positif de l'augmentation du STI sur la baisse de performances et un effet significatif quasi-linéaire positif sur la gêne ressentie pour toutes les conditions sonores.

(Jahncke et al., 2013) ont proposé une expérience avec une tâche de mémoire des mots plutôt que des chiffres. L'intelligibilité variait entre 0 et 0,71. Le niveau des signaux à la position du participant était de 51 dB(A). Pour faire varier l'intelligibilité (Jahncke et al., 2013) ont utilisé des signaux de parole contenant des phrases de quatre mots et un bruit de masquage. Après analyses statistiques, Jahncke et coll. ont conclu qu'il existait un effet global du STI sur la baisse des performances, mais pour les valeurs 0,35 et 0,7 il n'y avait pas de différence significative entre les DP.

(Ebissou et al., 2015) ont conduit une expérience en faisant varier le STI dans la zone sensible entre 0,25 et 0,65. La tâche principale était une tâche de mémoire de chiffres. Ebissou et coll. ont retrouvé un effet significatif de l'intelligibilité sur le décrétement de performance qui n'apparaissait que pour un groupe de participants.

Dans la continuité de la deuxième expérience (Ebissou, 2013), (Brocolini et al., 2016) ont conduit une expérience pour tester l'effet des fluctuations du bruit de fond. Les signaux de ces expériences ont été composés à partir d'un signal de parole cible et d'un bruit de fond constitué d'un ou plusieurs signaux de parole. Contrairement à (Ebissou, 2013), (Brocolini et al., 2016) ont retourné temporellement les signaux de parole masquant afin de les dépouiller de leur sens. Pour le calcul du score d'intelligibilité, c'est un indice prenant en compte les fluctuations temporelles du bruit ambiant qui est utilisé. Cet indice, appelé STIt, sera expliqué dans la partie suivante. Pour l'expérience de Brocolini et coll. l'indice d'intelligibilité variait entre 0,38 et 0,69.

Enfin, (Brocolini et al., 2016) ont utilisé pendant leurs expériences une tâche de mémoire de mots alors que (Ebissou et al., 2015) ont utilisé une tâche de mémoire de chiffres. En termes de résultats, (Brocolini et al., 2016) ont conclu que les fluctuations de bruit ambiant n'avaient pas d'effet significatif sur le DP et

ni sur le score d'ANRTLX, même si deux groupes de sujets (un groupe de participants plus performants et un groupe de participants moins performants) ont été distingués pour la performance brute et le score brut de NASA-RTLX.

Finalement, le modèle de Hongisto, 2005 a servi de référence pour la norme ISO 3382-3. Dans cette norme est définie la distance de distraction r_d . Il s'agit de la distance d'éloignement la source pour laquelle le STI est égale à 0,5. Selon (Virjonen, Keränen, & Hongisto, 2009), cette valeur de STI est choisie pour éviter les effets de la parole sur le rendement au travail. Or, les résultats présentés sur la figure 2.2 montrent une grande variabilité de mesure dans cette zone de variation du DP. Cette variabilité provient non seulement de la différence entre les groupes de participants différents à chaque expérience mais aussi des protocoles de mesure pour effectuer la tâche de sériation. D'une expérience à l'autre, plusieurs paramètres du protocole de mesure varient. De ce fait, il conviendra d'être particulièrement vigilant lors de la réalisation d'une nouvelle expérience sur l'ISE dû aux variations d'intelligibilité.

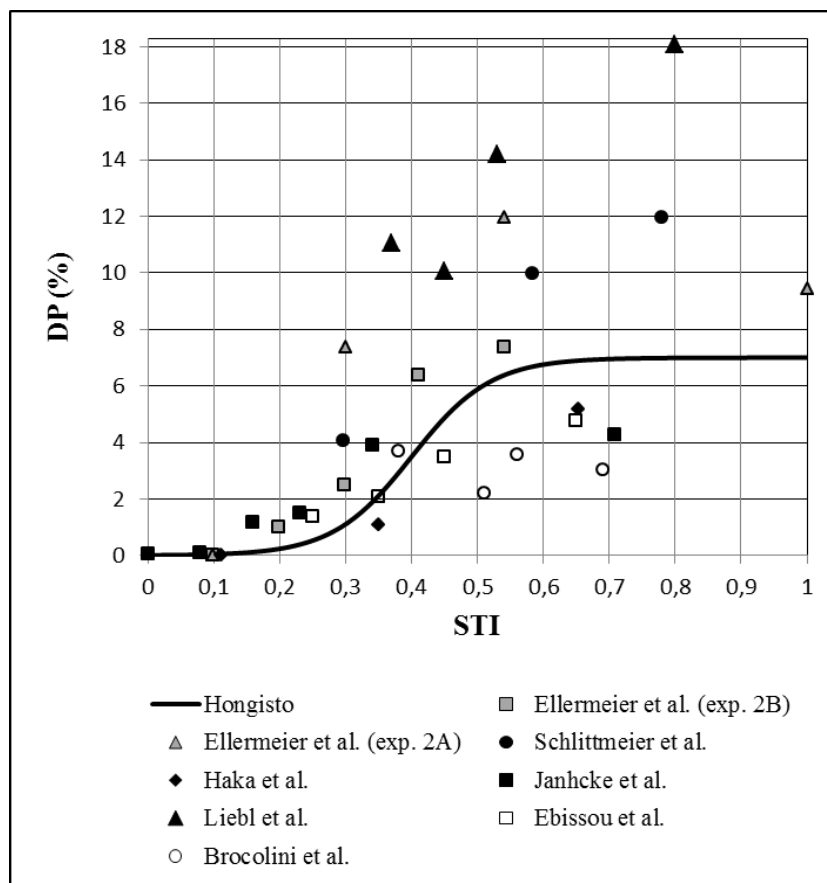


Figure 2.2. Le décrément de performance (DP) en fonction du STI pour les expériences conduites en laboratoire et pour le modèle prédictif (en trait plein).

Pour mettre en place une méthodologie pour le contrôle de la performance et personnalisation de la tâche, il faut déjà regarder de plus près les protocoles de mesures des expériences citées dans la partie précédente (Brocolini et al., 2016; Ebissou et al., 2015; Ellermeier & Hellbruck, 1998; Haka et al., 2009; Jahncke et al., 2013; S. J. Schlittmeier et al., 2008). Premièrement, dans ces protocoles de mesure, deux types de tâches mnésiques différents sont utilisés. Les participants doivent retenir soit des chiffres soit des mots pendant la tâche de mémoire. Deuxièmement, le nombre d'éléments que les participants doivent retenir n'est pas le même selon le protocole. Troisièmement, le rappel des éléments peut être immédiat ou différé de quelques secondes (on parle de phase de rétention). Les processus cognitifs font appel à la mémoire immédiate dans le premier cas et à la mémoire de travail dans le deuxième cas. Ainsi, selon le type de la restitution des éléments, la mémoire mise en jeu est différente. Quand la restitution des éléments se fait dans l'ordre, le participant se retrouve dans un processus de mémoire sérielle, alors que, quand il lui est demandé de manipuler l'information (ex. restituer les nombres dans l'ordre croissant ou faire un rappel libre) le processus cognitif est la mémoire de travail. Enfin, le temps de restitution n'est pas toujours le même d'une expérience à l'autre (libre pour Ebissou et coll., 15 secondes pour Haka et coll. ou encore 20 secondes pour Brocolini et coll.).

Les capacités mnésiques pour la mémoire de travail évoluent en fonction de l'âge (Bell, Buchner, & Mund, 2008) et (Meijer, De Groot, Van Boxtel, Van Gerven, & Jolles, 2006). Pour réduire l'effet de l'âge, une mesure de l'empan mnésique est envisageable. Cette mesure permet de connaître les capacités maximales des sujets à retenir un certain nombre d'éléments. L'empan mnésique, désigné ici comme une mesure préalable pour caractériser la variabilité interindividuelle, peut être utilisé pour personnaliser la tâche de mémoire.

Une autre différence entre les protocoles est la durée totale de l'expérience qui dépend du nombre et du type d'évaluations. (Haka et al., 2009) proposent d'accompagner la mesure de performance par des mesures subjectives d'anxiété, de sensibilité au bruit et du locus de contrôle (LOC)¹ (Jutras, 1987). Cela prolonge la durée totale de l'expérience jusqu'à 4 heures. De la même façon, (S. J. Schlittmeier et al., 2008) et (Jahncke et al., 2013) font des expériences de durée plus ou moins égale à 60 min. Selon Mackworth (Mackworth, 1956) au bout de 45 min d'expérience, un participant peut subir une baisse de vigilance, ce qui peut apporter un biais à la mesure de performance au cours de la tâche de sériation. Jusqu'à présent, les mesures de l'état psychologique des participants en fonction du temps n'ont pas été

¹ Le locus de contrôle (LOC) est défini comme la « façon dont la personne interprète la relation de causalité entre son comportement et diverses situations considérées comme des renforcements, elle se crée des attentes généralisées quant à ce qui la contrôle. L'individu qui croit fermement pouvoir contrôler en grande partie ce qui lui arrive est considéré comme ayant un lieu de contrôle interne. Celui, qui au contraire croit que ce qui lui arrive est en grande partie le résultat des facteurs extérieurs à lui-même, aurait un lieu de contrôle externe. »

considérées. Les protocoles mentionnés précédemment se focalisaient sur l'effet des conditions sur les différentes mesures mais ne considéraient pas la dimension temporelle.

Pour résumer, les protocoles des différents chercheurs ne font pas consensus sur les tâches utilisées.

Mis à part le fait que l'intelligibilité a un effet sur les performances, les résultats moyens obtenus sont différents d'une expérience à l'autre. On note également une grande variabilité interindividuelle pour chaque mesure. (Ebissou et al., 2015) et (Brocolini et al., 2016) ont travaillé sur cette variabilité et ils proposent de l'expliquer par la charge mentale générée par la tâche en la mesurant avec le NASA-TLX (Ebissou et al., 2015; Sandra G. Hart, 2006). Les résultats de Brocolini et Ebissou sur la charge de travail ne donnent pas une explication suffisante à l'existence de ces grands écarts-types. Cela signifie que ces écarts ne proviendraient pas obligatoirement, ou du moins pas que, de la charge de travail. Pour mieux caractériser cette variabilité interindividuelle, des mesures subjectives peuvent être faites comme : un test du « locus de contrôle » (Jutras, 1987) au travers du questionnaire de Levenson et un test de sensibilité à l'effet d'interférence au travers la tâche de STROOP (Boujon, 2002) pourraient être envisagés.

Enfin, comme dit précédemment, il n'y a pas de consensus sur le protocole de mesures, notamment en ce qui concerne les durées d'évaluation. Or, celle-ci peut avoir un impact sur les performances. Cet impact sur la performance en fonction de la durée s'évalue au travers des mesures du niveau de vigilance au début et au cours du temps de l'expérience (Mackie, 2013; Mackworth, 1956).

2.1.3. Evaluation des modulations de l'intensité sonore

Le STI est un indicateur dédié à la mesure de l'intelligibilité qui nécessite, en plus de la mesure du bruit de fond, l'utilisation d'une source de bruit. Selon la norme (IEC-60268-16, 2011), la procédure de mesure doit être appliquée dans un local vide (sans présence de salariés) et elle est relativement complexe. Elle nécessite la mise en place d'une source de bruit calibrée. La question se pose pour d'autres indicateurs susceptibles de caractériser la présence de parole intelligible dans un signal donné mesuré dans un bureau ouvert en pleine activité.

Puisque l'une des propriétés d'un signal de parole est sa modulation d'énergie à des fréquences inférieures à 16 Hz, correspondant au débit syllabique d'une conversation non contrainte, une alternative intéressante au STI consiste à évaluer directement « la profondeur » (l'amplitude) de modulation d'un bruit ambiant dans un local en pleine activité de travail. Il existe deux indicateurs à même de pouvoir le faire : la force de fluctuation (F_s) et le niveau équivalent de modulation (M_{eq}).

2.1.3.1. Définition de la force de fluctuation

La force de fluctuation (F_s) est un attribut sonore développé au départ par Zwicker et Fastl (Zwicker & Fastl, 2013) et ensuite par (Aures, 1985). Il décrit la modulation de l'intensité acoustique d'un signal autour de la fréquence de 4 Hz et il est formulé de la façon suivante:

$$F_s = \frac{\Delta L}{\frac{4 \text{ Hz}}{f_{mod}} + \frac{f_{mod}}{4 \text{ Hz}}}$$

Où ΔL est la profondeur de modulation selon (Daniel & Weber, 1997) correspondant à la modulation perçue et f_{mod} est la fréquence de modulation où une différence de valeur de sonie selon (Zwicker & Fastl, 2013). La force de fluctuation est maximale lorsque la fréquence de modulation est de 4 Hz.

Une autre propriété de la force de fluctuation est sa sensibilité aux variations du niveau sonore d'un signal. Lorsque le niveau sonore augmente la profondeur de modulation perçue augmente ainsi que la force de fluctuation augmente. Un exemple est donné sur la figure 2.3. La force de fluctuation est calculée, en utilisant le logiciel dB Sonic, pour un bruit blanc modulé à 4 Hz avec une amplitude de 1 et à différents niveaux sonores (40, 50, 60, 70 et 80 dB(A)). Les résultats de la figure montrent bien que la force de fluctuation augmente linéairement avec le niveau sonore.

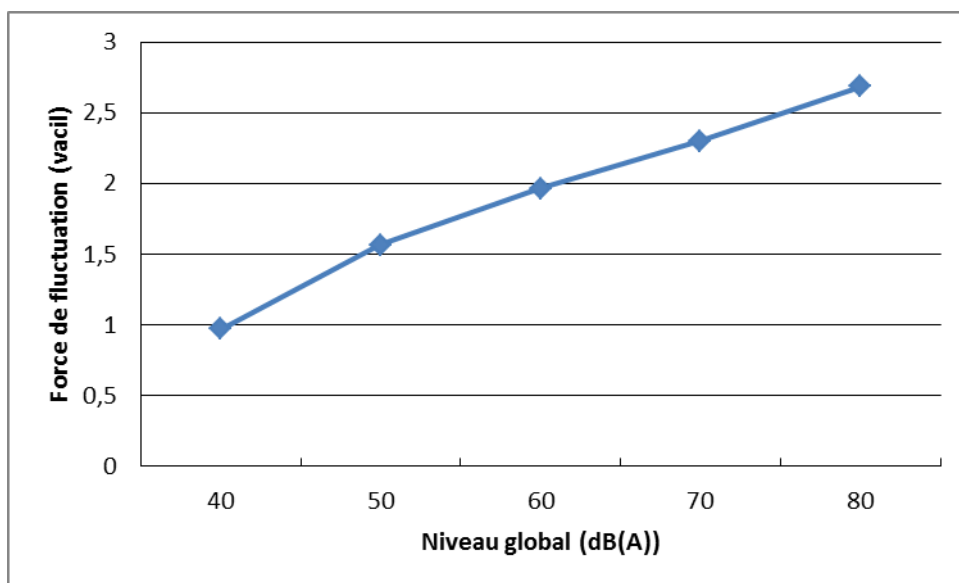


Figure 2.3. Force de fluctuation en fonction du niveau global d'un signal de bruit blanc modulé en amplitude à une fréquence de 4 Hz.

Dans le cadre des bureaux ouverts, cet indicateur a été proposé par (Schlittmeier, Weissgerber, Kerber, Fastl, & Hellbrück, 2012). Dans l'article est mise en évidence la relation entre la baisse de performance lors des tâches de sériation et la force de fluctuation. Le modèle proposé montre une augmentation quasi-linéaire de la baisse de performance avec l'augmentation de la force de fluctuation. De ce fait, la force de fluctuation semble être un bon indicateur d'évaluation de la performance dans les conditions de laboratoire. En revanche, le point faible de cet indicateur pour des mesures en entreprise est sa variabilité avec le niveau sonore. Or, comme dit dans l'introduction de ce document, la plainte des employés vis-à-vis du bruit ne provient pas du niveau sonore du bruit généré dans les locaux. Des expériences en laboratoire montrent également que les variations du niveau de bruit n'impactent pas les performances des participants. Par exemple, il n'y a pas de différence entre un bruit stationnaire (d'un niveau qui peut varier entre 45 et 60 dB(A) – plage de variation mesurée dans les bureaux ouverts) et le silence (Brocolini et al., 2016; Ebissou et al., 2015; Ellermeier & Hellbruck, 1998; Haka et al., 2009; Hongisto, 2005; Jahncke et al., 2013). Un indicateur qui serait sensible à de telles variations, comme la force de fluctuation, risque d'introduire un biais lors d'une évaluation du niveau de modulation. Dans ce cas, un autre indicateur est proposé pour évaluer le niveau équivalent de modulation d'un signal.

2.1.3.2. *Evaluation du niveau équivalent de modulation*

Des travaux récents à l'INRS ont permis de définir un indicateur qui consiste à calculer la profondeur de modulation d'un signal à une fréquence d'échantillonnage de 8 Hz (pas temporel de 125 ms) en faisant la différence entre le niveau moyen Leq_A (niveau équivalent pondéré A) sur la durée du bruit considéré et l'indice fractile 90 de ce bruit ambiant :

$$Meq_{A,125ms} = Leq_A - L_{90A,125ms} \quad (dB(A))$$

Où $L_{90A,125ms}$ est la valeur de $Leq_{A,125ms}$ (une fonction du temps représentant les valeurs de Leq_A toutes les 125 ms) atteinte ou dépassée 90 % du temps. Cette valeur est a priori représentative du niveau de bruit de fond stationnaire dans le bruit ambiant. La figure 2.4 montre une mise en application du calcul du $Meq_{A,125ms}$. En bleu est représenté un signal de parole intelligible de cinq secondes. La courbe noire représente le calcul du $Leq_{A,125ms}$ en dB(A) avec l'échelle du niveau sonore à droite et les deux courbes rouges correspondent aux valeurs de $Leq_A = 61,8 \text{ dB(A)}$ et de $L_{90A,125ms} = 48,9 \text{ dB(A)}$. La valeur de $Meq_{A,125ms}$ est calculée comme la différence entre les deux courbes rouge et elle est de 12,9 dB(A).

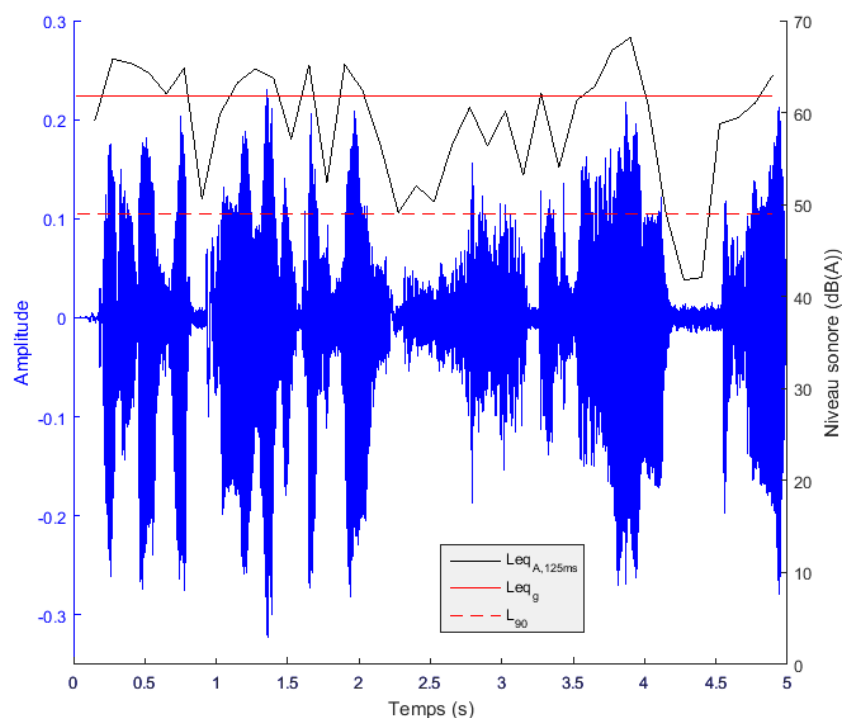


Figure 2.4. Représentation d'un signal audio en fonction du temps. En bleu est représenté le signal temporel avec son amplitude sur l'axe de gauche, en noir est représenté le $Leq_{A,125ms}$ de ce signal audio, en rouge (trait plein) est représenté la valeur du niveau moyen du signal (Leq_g) et en pointillés est représentée la valeur du $L_{90,125ms}$ du signal. L'axe des valeurs du niveau sonore est donné à droite de la figure.

Cet indicateur a été proposé dans le cadre de projets financés par l'ANSES (GABO et MEPAS) ((P Chevret, 2015a; Kostallari, Parizet, & chevret, 2016)). Une grande campagne de mesures en entreprises a été conduite lors de ces deux projets. La base de données constituée à l'issue de cette campagne regroupe à la fois des mesures physiques du bruit (temps de réverbération, décroissance spatiale, bruit ambiant) et la connaissance de la perception de l'environnement sonore par les salariés. 25 entreprises ont été visitées et 619 personnes ont été interrogées (P Chevret, 2015a).

La répartition des entreprises, établie en fonction du type d'espace ouvert qu'elles mettent à disposition des salariés, est présentée dans le tableau 2.1. La typologie est établie selon la norme NF S 31-199.

Type	Centre d'appel	Plateau collaboratif	Plateau administratif	Accueil du public
Nombre d'entreprises	4	12	2	7
Nombre de répondants au questionnaire	150	259	83	127

Tableau 2.1 Répartition en fonction du type d'espace ouvert des entreprises figurant dans la base de données utilisée pour cette étude et des questionnaires recueillis.

Le questionnaire utilisé a été mis au point au cours du projet ANSES GABO (il est maintenant intégré dans la norme NF S 31-199). Le questionnaire comprend une centaine de questions qui portent à la fois sur l'environnement physique en général, sur l'environnement sonore, sur la fatigue et la gêne ressenties et sur la santé. Les réponses retenues portent surtout sur l'environnement sonore et la gêne ressentie en fonction des différents types de bruit. Le nombre de questionnaires recueillis par type d'entreprise est donné dans le tableau 2.1.

La figure 2.5 présente une synthèse des résultats des 12 entreprises pour lesquelles il y a eu à la fois des mesures subjectives et objectives. Elle présente le niveau subjectif de gêne (différentes couleurs) en fonction des facteurs $L_{eq,A}$ (abscisses) et $MeqA125ms$ (ordonnées). Sur ce schéma, les rectangles de différentes couleurs correspondent à différents niveaux de gêne (vert – gêne modérée, jaune claire – gêne moyenne, jaune foncé – gêne élevée, rouge – gêne très élevée). On peut y lire par exemple que pour des niveaux de bruit ambiant inférieurs à 60 dB(A), l'effet du $MeqA125ms$ sur la gêne est significativement différent entre les catégories 10 dB(A) et 15 dB(A), que ce soit pour les plateaux collaboratifs ou les salles d'accueil du public (pour les deux autres types d'espaces, le $MeqA125ms$ n'a jamais atteint 15 dB(A)).

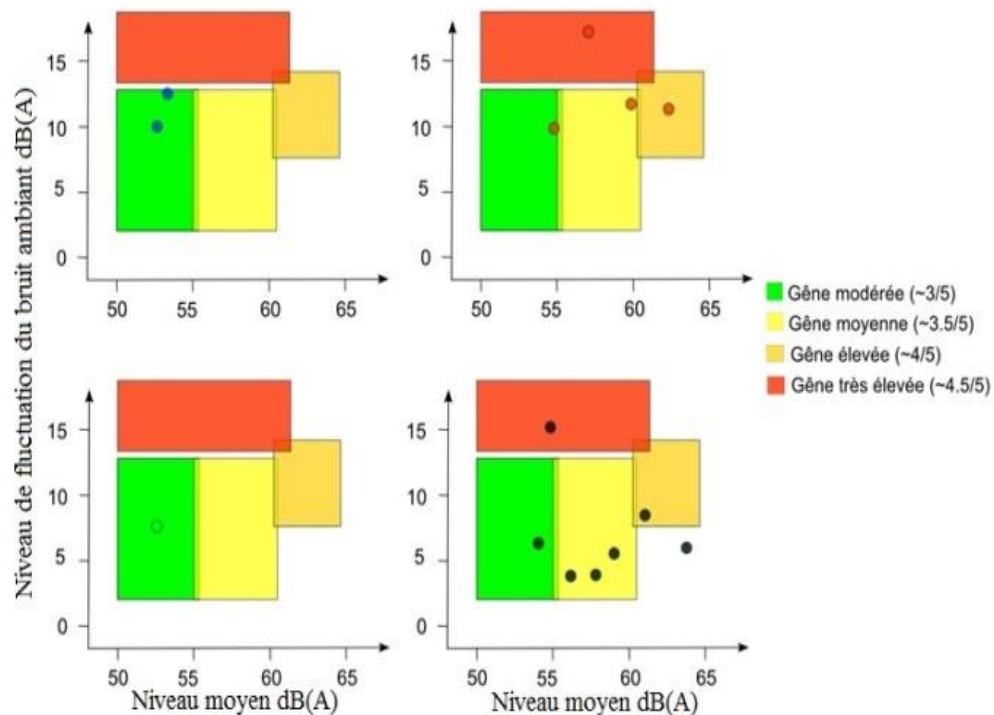


Figure 2.5. Classification des espaces ouverts de la base de données MEPAS. (haut gauche) bleu : les centres d'appels, (haut droite) rouge : les plateaux collaboratifs, (bas gauche) vert : le plateau administratif, (bas droite) noir : les salles d'accueil du public

A partir de ces mesures, l'utilisation du STI et du $\text{MeqA}_{125\text{ms}}$ semble être possible pour caractériser un bureau ouvert. Le premier se concentre sur la dégradation du signal de parole d'un poste à l'autre en prenant en compte les effets de salle et le second consiste à mesurer au poste de travail le bruit ambiant généré dans le local en activité. Les deux indicateurs sont donc complémentaires pour pouvoir définir la qualité d'un bureau. Il est donc intéressant de regarder l'existence d'un lien possible entre les deux indicateurs.

Pour étudier ce lien une procédure de calcul de STI et de $\text{MeqA}_{125\text{ms}}$ est appliquée sur des signaux où le RSB varie entre -15 dB et 15 dB. Ces signaux sont tous composés d'un signal cible de parole totalement intelligible (Phrases des listes de Fournier, Combescure et HINT) et d'un bruit blanc stationnaire. La durée de chaque signal est de 10 minutes. Le spectre LTASS (Long Term Average Speech Spectrum) est appliqué au départ sur les deux signaux, la cible et le bruit. Ensuite, la somme des deux signaux est faite pour différents RSB entre -15 dB et 15 dB. Pour chaque signal obtenu, le STI et le $\text{MeqA}_{125\text{ms}}$ sont calculés. Les valeurs des deux indicateurs sont représentées sur la figure 2.6. Cette dernière montre que pour un $\text{STI} < 0,4$, qui correspond à un score d'intelligibilité d'environ 50 %, le $\text{MeqA}_{125\text{ms}}$ augmente lentement. Pour des $\text{STI} > 0,4$, la relation entre les deux indicateurs devient

proche de la linéarité. Cela qualifie le $\text{MeqA}_{125\text{ms}}$ comme un indicateur de forte intelligibilité lorsque l'environnement sonore contient majoritairement de la parole plus ou moins intelligible, ce qui est le cas d'un bureau ouvert. Ainsi, la valeur maximale de $\text{MeqA}_{125\text{ms}}$ de 15 dB(A) est une mesure indirecte d'un RSB de 15 dB.

Dans les mesures de $\text{MeqA}_{125\text{ms}}$ *in-situ*, les valeurs peuvent aller au-delà de 15 dB(A). Cela peut être dû à des bruits à fort niveau à côté de l'appareil de mesure. Pour éviter cela, soit une mesure de plusieurs heures (4-8 heures de mesure) est nécessaire, soit la mesure doit être nettoyée de ces événements ponctuels.

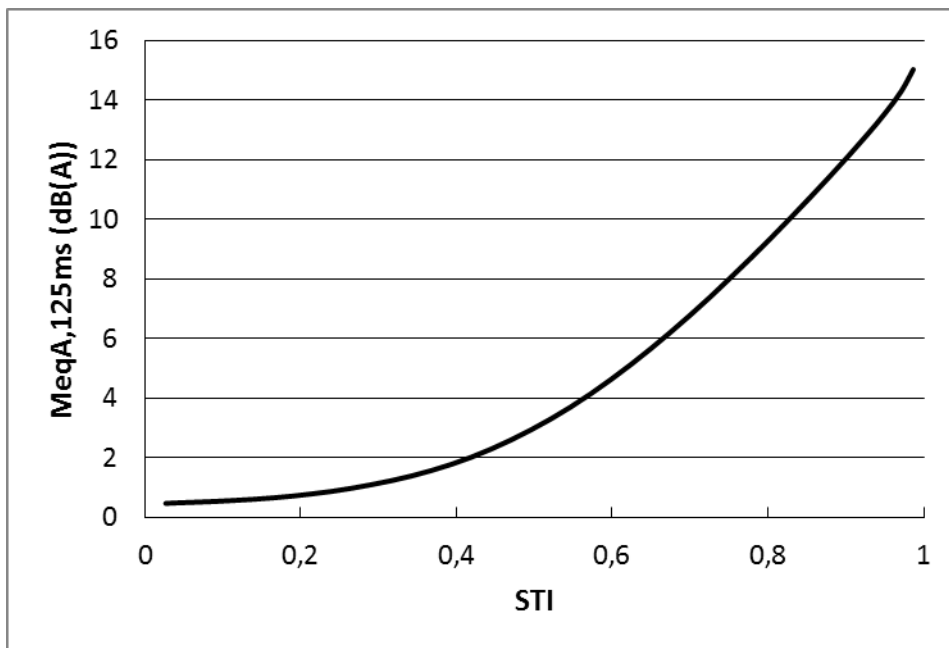


Figure 2.6. $\text{MeqA}_{125\text{ms}}$ en fonction du STI pour des signaux composés de parole intelligible et d'un bruit blanc stationnaire. Cette courbe est obtenue en faisant varier le rapport signal sur bruit de -15 à 15 dB.

2.2. Mesures objectives et subjectives pour la réalisation d'une expérience de longue durée

Les expériences mentionnées dans la partie 1.1 s'intéressent plutôt aux performances cognitives lors de tâches de courtes durées, plus particulièrement des performances mnésiques lors d'une tâche de sériation. L'avantage de ce type d'études est la compréhension des mécanismes cognitifs mis en œuvre lorsque les participants effectuent la tâche et sont confrontés à l'ISE. L'inconvénient relève des

protocoles de mesure qui ne permettent pas de faire un lien direct avec les études menées sur le terrain. Lors de ces expériences ni la durée d'expérience ni la tâche ne permettent de représenter la réalité des bureaux ouverts. Cette partie de l'état de l'art a pour but de définir pour les expériences en laboratoire :

- Une tâche principale confiée aux participants tout au long d'une journée de travail
- Une série de mesures objectives et subjectives afin d'observer leurs variations en fonction des conditions sonores.

Pour le premier point, la tâche principale doit être d'une complexité cognitive comparable à celle d'un travail réel en bureau ouvert. Selon (Flower & Hayes, 1981), une tâche d'écriture passe par un processus de réflexion mentale qui demande une organisation précise d'idées. Pour ce faire, lors de ce type de tâches, plusieurs processus cognitifs sont impliqués, tels que la génération d'idées, la sollicitation de la mémoire à long terme, l'organisation et la transformation de ces idées en représentation orthographique. Ces processus cognitifs sont plus complexes et donc plus coûteux à mettre en place, mais plus proches d'un travail de bureau que la tâche de sériation utilisée auparavant (Keus van de Poll & Sörqvist, 2016). De plus, l'avantage d'une tâche comme la synthèse d'articles est la possibilité d'occuper les participants pendant toute une journée de travail. De ce fait, les mesures subjectives réalisées lors d'une journée d'expérience peuvent être faites avec une méthodologie déjà appliquée lors des enquêtes *in-situ*. Un autre avantage d'utiliser une tâche durant toute une journée est la possibilité d'augmenter le temps d'exposition aux conditions sonores. Cela veut dire que la durée d'exposition à une condition sonore peut être équivalente à celle d'une journée de travail en bureau ouvert. Une telle durée d'exposition rendrait les conditions, auxquelles sont confrontés les participants, plus représentatives de la réalité observée lors des enquêtes sur le terrain.

Pour le deuxième point sur les mesures objectives et subjectives qui doivent être réalisées, une revue de la littérature est nécessaire sur les expériences de longue durée ayant pour but l'étude des effets du bruit sur les participants effectuant une ou plusieurs tâches par condition sonore. Seulement trois articles relatent des expériences de longue durée :

- (Jahncke, Hygge, Halin, Green, & Dimberg, 2011) parlent des effets des conditions sonores sur la fatigue ressentie. Les participants ont réalisé une expérience composée de deux conditions sonores différentes. La première condition avait un niveau global de 51 dB(A) à la position du participant et le STI variait au cours de la passation pour une même condition sonore. Ces variations se trouvaient dans une plage entre 0 et 0.66. Pour la deuxième condition sonore, le niveau moyen était de 39 dB(A) et le STI variait entre 0 et 0.58. La durée d'exposition était de 120 minutes par condition sonore. Pour étudier les effets du bruit, différentes tâches de courte durée ont été utilisées. Cela permettait d'étudier les processus cognitifs mais aucune des tâches

n'était écologiquement valide. En revanche, les résultats de l'étude ont montré un effet des conditions sonores sur la mesure subjective de la fatigue ressentie. Les participants se déclaraient plus fatigués pour la condition de niveau de bruit élevé.

- (Lund et al., 2012) proposent une expérience de longue durée dans une salle aménagée comme un bureau ouvert (plusieurs postes de travail, présence de cloisonnettes entre deux postes etc.) Lors de cette expérience, les participants ont été exposés à deux conditions sonores différentes. La première avait un niveau global de 50.7 dB(A) et la deuxième avait un niveau global de 55 dB(A)). Le bruit utilisé était un enregistrement de bruits de bureau ouvert avec plusieurs types de source sonore (téléphones, passages, machines imprimantes). La parole intelligible était présente dans 53% du signal. La durée d'exposition par condition sonore était de 7h. Lors de l'expérience, les participants réalisaient différentes tâches de courte durée. Pour chaque tâche, le temps de réaction pour donner une réponse était mesuré. L'hypothèse émise lors de cette expérience était le ralentissement du temps de réaction lors de l'exposition à la deuxième condition sonore (niveau global de 55 dB(A)). Ce ralentissement correspondrait alors à un état de fatigue mentale pour les participants. Cependant, les résultats n'ont pas montré d'effet significatif des conditions sonores sur la mesure de la fatigue mentale.
- (Varjo et al., 2015) proposent une expérience de relativement longue durée. La durée d'exposition par condition sonore était de 120 minutes. Deux conditions différentes ont été proposées aux participants. Pour la condition A, l'intelligibilité de la parole était basse et la température dans la salle était de 23.5°C. Pour la condition B, l'intelligibilité de la parole était élevée et la température dans la salle était de 29.5°C. Cette configuration n'a pas permis d'observer un effet précis des conditions sonores sur les performances des participants mais plutôt un effet des deux facteurs réunis. Plusieurs tâches de courte durée ont été utilisées pour occuper les participants lors de l'expérience. Plusieurs mesures subjectives, comme la charge mentale de travail ou la fatigue ressentie, ont été faites également. Les résultats ont montré un effet des conditions sur l'ensemble des mesures. Particulièrement, les participants se déclaraient plus fatigués lors de la condition B que lors de la condition A.

Pour les trois expériences mentionnées ci-dessus, les protocoles de mesures sont très différents. Les conditions sonores utilisées ne concernent pas directement l'intelligibilité de la parole ou le niveau de modulation d'amplitude. Dans les deux premières expériences, l'intérêt est porté plutôt sur les variations du niveau global et dans la troisième expérience le but est d'observer un effet de l'ensemble des facteurs de l'environnement (bruit et température). En revanche, lors des trois expériences, est

évoquée la notion de fatigue avec deux types de mesure différents : subjective – au travers de questionnaires et objective – au travers de la mesure du temps de réaction.

2.2.1. Méthodes de mesures de la fatigue ressentie

Selon la littérature, plusieurs auteurs semblent être en accord pour définir la fatigue comme un facteur intermédiaire entre l'éveil et l'endormissement. La fatigue se manifeste à la suite :

- d'un sommeil insuffisant, d'une activité physique ou mentale (E. M. A. Smets, B. Garssen, B. Bonke, & J. C. J. M. De Haes, 1995)
- des conditions difficiles d'exécution d'une activité (Torbjörn Åkerstedt & Folkard, 1995; Folkard & Monk, 1979a)
- des conditions sonores particulières, par exemple l'augmentation du niveau de modulations d'amplitude (Amato et al., 2017)
- des variations du rythme biologique au cours des 24 heures, appelé rythme circadien (T. Åkerstedt, 1995; Monk, Moline, Fookson, & Peetz, 1989).

Ainsi, concernant les facteurs externes, la fatigue peut dépendre soit d'une charge mentale de travail due à la tâche soit d'une charge mentale supplémentaire due aux conditions environnementales dans lesquelles les participants effectuent cette tâche. Dans les deux cas, cette charge mentale peut provoquer des variations du rythme circadien de la fatigue. Pour expliquer ces variations, (Achermann & Borbély, 1994) font des mesures d'attention soutenue et de somnolence. Leur modèle explique que lorsque les participants se sentent somnolents, les performances réalisées lors des tâches de travail diminuent et lorsqu'ils se sentent éveillés ces performances sont maximales. Ainsi, une charge mentale de travail importante peut provoquer un état de somnolence. Cependant, au cours d'une expérience où les participants sont obligés d'effectuer une tâche le mieux possible, malgré un niveau de vigilance faible, entraînant classiquement de la somnolence, un phénomène compensatoire entre la vigilance et la tension peut avoir lieu pour maintenir les performances à la tâche. Le modèle proposé par (Robert E. Thayer, 1986; Thayer, 1987) consiste à montrer que lorsque la vigilance est élevée, la tension est généralement faible et inversement dans certains cas. Pour Thayer, la vigilance correspond à une activation énergétique et la tension correspond à une activation anxieuse. Lorsqu'un individu est en activité, au cours d'une tâche représentant une charge de travail élevée, la vigilance diminue mais les participants se sentent de plus en plus anxieux et l'activation tendue (ou tension) augmente. De cette façon, la performance est maintenue malgré un niveau de vigilance faible dû à une charge mentale élevée.

2.2.2. Méthode de mesure de la charge mentale de travail

Pour rappel, cette partie sert à expliquer tous les éléments nécessaires pour faire des mesures subjectives liées aux effets du bruit sur les participants réalisant une expérience écologiquement valide. Lors des expériences de courte durée, une mesure de la charge mentale de travail a été faite pour mieux comprendre les performances lors de la tâche de sériation (Brocolini et al., 2016; Ebissou et al., 2015). Ces mesures ont été faites avec le questionnaire de NASA-TLX développé par Hart et Staveland (Sandra G Hart & Staveland, 1988). Ce questionnaire évalue la charge mentale de travail en faisant une moyenne des scores de six dimensions : l'exigence mentale, l'exigence physique, l'exigence temporelle, la performance, l'effort fourni et la frustration. Ceci permet d'évaluer la charge mentale de travail due seulement à la tâche. En revanche, ce questionnaire n'évalue pas une charge mentale de travail due à des conditions d'environnement. Par conséquent, la méthode d'évaluation de l'effet du bruit doit être adaptée pour pouvoir suivre l'évolution du travail et de l'état psychologique des participants lors de l'expérience. Les enquêtes sur le terrain réalisées par l'INRS (Perrin Jegen & Chevret, 2016; Pierrette et al., 2015) proposent une méthodologie de mesure basée sur l'utilisation de questionnaires. Dans ces études, sont évaluées la gêne occasionnée par l'environnement sonore (Pierrette et al., 2015) et les perturbations que cette gêne engendre lors de l'activité de travail des employés (Perrin Jegen & Chevret, 2016). La difficulté pour les études sur le terrain est la quantification de ces perturbations dues au bruit lors de l'activité de travail. Cette difficulté d'évaluation provient du fait que le type de tâches à réaliser varie en fonction du moment de la journée et du type de bureau ouvert. De ce fait, la performance et la baisse de performance lors de ces tâches variables sont difficilement évaluables. Il est donc nécessaire d'avoir un modèle de mesure représentant cette baisse de performance au travers des résultats de questionnaires.

Dans ce but, (Galy, Cariou, & Mélan, 2012) proposent une expérience où elles comparent des performances à une tâche effectuée dans des conditions « faciles » et dans des conditions « difficiles ». Elles observent une baisse de performance significative lorsque la tâche est réalisée dans les conditions « difficiles ». Cette différence significative est également observée sur la charge mentale de travail. Il semblerait qu'il existe une relation entre les performances et la charge mentale de travail (Galy, 2017). Cette charge perçue est plus élevée lors des conditions « difficiles » (quand les performances sont mauvaises) que lors des conditions « faciles ». Cela veut dire que l'évaluation de la charge mentale de travail est sensible aux variations des conditions dans lesquelles une personne effectue une tâche. Il semblerait que ces variations de la charge mentale de travail soient influencées par plusieurs facteurs cognitifs. Chacun de ces facteurs, expliqués dans la suite de cette partie, influence des dimensions

particulières de la charge mentale de travail (Galy, 2017; Galy et al., 2012). Selon ces études, la charge mentale de travail contient trois dimensions différentes :

- La charge externe – est définie comme la charge provenant des conditions dans lesquelles une personne effectue une tâche de travail
- La charge intrinsèque – est définie comme la charge due à l'exécution de la tâche
- La charge essentielle – est définie comme la charge qui correspond au coût que représente la mise en œuvre des stratégies de régulation pour réduire le coût cognitif de l'activité.

A ces trois dimensions de charge mentale, Galy (2017) rajoute une dimension déterminante des différentes catégories de la charge mentale de travail :

- Les ressources disponibles – sont les ressources cognitives qu'une personne possède pour réaliser une activité quelconque.

Dans le cas de la présente étude, la charge externe est directement liée à l'environnement sonore et à la façon dont une personne perçoit cet environnement. Les ressources disponibles sont fonction de l'état psychophysiologique d'une personne. Ces ressources sont liées à des facteurs subjectivement mesurés de l'état physiologique d'une personne (comme la fatigue, la somnolence, la vigilance etc.) qui subit des variations au cours d'une journée de travail. La charge intrinsèque est liée à la tâche, mais aussi aux capacités cognitives pour réaliser une tâche de travail (Galy et al., 2012). Ensuite, la charge essentielle est liée à l'efficacité cognitive d'une personne pour maintenir ses performances lors d'une tâche de travail, lorsque les conditions environnementales changent par exemple. Cette dimension est directement influencée par la charge externe et la charge intrinsèque. Sur la figure 2.7, sont données schématiquement les relations entre les quatre dimensions de la charge mentale de travail. Cette figure montre que les ressources disponibles sont divisées en deux parties : les ressources obligatoirement utilisées et les ressources restantes. Les ressources obligatoirement utilisées sont celles qui sont utilisées pour faire face aux charges externe et intrinsèque. Si les charges externe et intrinsèque ne sont pas trop élevées, il y aura des ressources restantes, qui pourront alors être utilisées pour la charge essentielle, c'est-à-dire la mise en œuvre de stratégies de régulation de l'activité. La performance pour réaliser la tâche est assurée et maintenue lorsque le coût que représentent ces trois charges ne dépasse pas les ressources disponibles d'une personne. En revanche, dans le cas d'un dépassement des ressources disponibles, la tâche n'est pas effectuée correctement et la performance est dégradée.

L'intérêt de cette étude porte sur l'observation de cette charge mentale de travail, mais aussi de la fatigue ressentie et des facteurs liés à cette fatigue, comme la somnolence, la vigilance et la tension. Ces observations seront faites en fonction des conditions sonores et tout le long de la journée (cf. chaque condition sonore correspond à une journée d'expérience). Ainsi, il est envisageable d'évaluer comment

l'environnement sonore est perçu tout au long d'une journée. Dans les études précédentes, seule la gêne sonore était évaluée. Ici, nous distinguons la gêne sonore et la fatigue sonore et nous émettons l'hypothèse que ces deux dimensions ne se comportent pas de la même façon lorsque la durée d'exposition au bruit augmente. Pour observer l'évolution de ces indicateurs en fonction des conditions sonores et de la durée d'exposition, l'évaluation subjective de l'environnement sonore comportera trois dimensions différentes. Les participants vont devoir répondre, plusieurs fois au cours de la journée, si l'environnement sonore est calme ou bruyant, s'il est gênant et s'il fatiguant. Selon le modèle ICA (Individu-Charge-Activité) (Galy, 2017), tous ces facteurs auront un impact direct sur la charge mentale de travail et en particulier la dimension externe de la charge mentale.

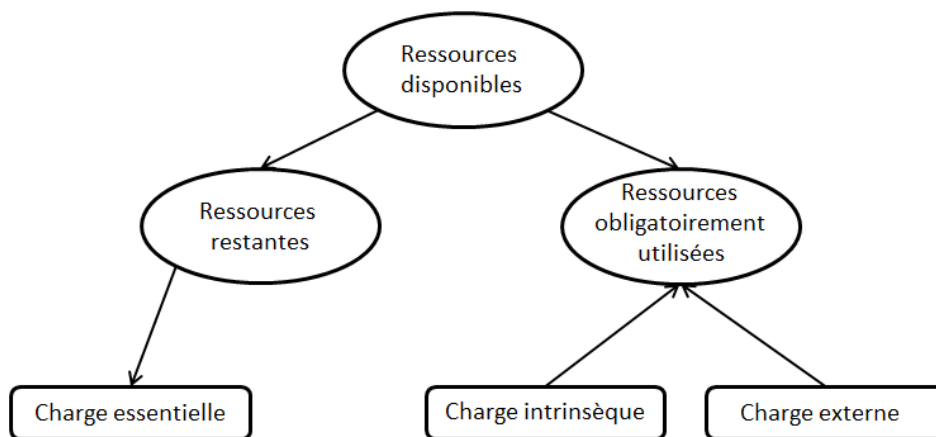


Figure 2.7. Schéma synthétique des interactions entre la charge intrinsèque, la charge externe, les ressources disponibles et la charge essentielle (Galy, 2017).

3. Expérience de courte durée sur l'évaluation des effets de l'intelligibilité de la parole lors d'une tâche de sériation

3.1. Hypothèses

La première expérience de cette thèse consiste à évaluer l'effet de l'intelligibilité de la parole sur les performances lors d'une tâche de sériation. Le modèle élaboré par Hongisto (Hongisto, 2005) propose d'établir un lien entre le STI et un décrement de performance (DP) lors d'une telle tâche. Ce lien présente la forme d'une sigmoïde (voir figure 2.2) et sépare les effets de l'intelligibilité de la parole sur le décrement de performance en trois zones différentes :

- $STI < 0,2$ où la parole n'est assez intelligible pour nuire à la performance
- $0,2 < STI < 0,7$ où le DP augmente rapidement avec l'intelligibilité de la parole ;
- $STI > 0,7$ où le décrement de performance est constant car le signal de parole est considéré comme totalement intelligible.

Cette relation entre STI et DP a été intégrée dans la norme ISO 3382-3 pour définir des indicateurs d'évaluation de la qualité sonore d'un bureau ouvert. Parmi ces indicateurs d'évaluation, deux distances sont définies en lien direct avec le STI : la distance de distraction et la distance de confidentialité. La distance de distraction, définie à partir de la position d'un locuteur, représente la distance à partir de laquelle le STI reste inférieur à 0,5. On considère ici que la voix du locuteur reste intelligible (voir figure 2.2), mais sa perturbation de l'activité des autres occupants sera acceptable. La distance de confidentialité est définie comme étant la distance à partir de laquelle une valeur de STI de 0,2 est atteinte (la parole n'est plus intelligible). Pourtant, ces deux valeurs ont été choisies sans prendre en considération l'ensemble des expériences décrites dans le chapitre 2 et représentées sur la figure 2.2. Selon (Virjonen et al., 2009), la valeur de $STI = 0,5$ est choisie pour éviter que la parole n'affecte les performances au travail et la valeur de $STI = 0,2$ est choisie afin que la parole ne réduise pas les performances au travail. A partir de cette figure, pour la valeur de $STI = 0,2$ les résultats ne montrent pas de grandes variations du DP par rapport à la valeur de $STI = 0$. Cela signifie que l'effet de l'intelligibilité sur le DP peut être considéré proche de 0. En revanche, pour la valeur de $STI = 0,5$ les résultats montrent une grande variabilité entre les études et ne permettent pas de définir cette valeur comme « valeur cible » pour mesurer la distance de distraction.

La grande majorité des expériences réalisées utilisent un STI qui se situe entre 0 et 0,7. En effet, peu d'expériences testent le décrétement de performance pour des valeurs de STI au-delà de 0,7, ainsi la littérature ne permet pas de conclure à un plateau pour les fortes valeurs de STI.

Par ailleurs, un autre modèle met en relation le DP et la force de fluctuation (Schlittmeier et al., 2012) et montre un effet linéaire de la force de fluctuation sur le DP. Cet indicateur est fortement relié à la modulation d'amplitude du signal, son maximum étant atteint lorsque la fréquence de modulation est proche de 4 Hz. Cette fréquence correspond au débit syllabique moyen d'un discours sans contrainte, ce qui justifie que la force de fluctuation augmente avec l'intelligibilité d'un signal de parole, donc avec le STI.

Un premier objectif de cette expérience était d'enrichir les valeurs expérimentales de décrétement de performance dans des situations où il varie fortement avec l'intelligibilité afin de tester les indications de la norme ISO 3382-3 mais également dans des situations où l'intelligibilité de la parole est forte (STI supérieur à 0.7) afin de tester les deux modèles (linéaire ou sigmoïdal).

Par ailleurs, l'ensemble des expériences présentées dans la figure 2.2 montre une grande variabilité interindividuelle. Cette variabilité peut provenir non seulement de la sélection des participants (âge, métier, niveau de diplôme, etc.) mais aussi de la difficulté de la tâche de sériation. Selon la méthodologie utilisée, la tâche peut être plus ou moins difficile pour tous les sujets ou pour un groupe de participants. A titre d'exemple, Jahncke et coll. (Jahncke et al., 2013) demandent aux participants de retenir des mots, alors que ce sont des chiffres qui sont à retenir dans les autres expériences. Des différences sont également observées au niveau des phases de rétention : une phase de rétention de 10 secondes est appliquée par Schlittmeier et coll. (S. J. Schlittmeier et al., 2008) ou Liebl et coll. (Liebl et al., 2016), alors que, dans les études de Ellermeier et Hellbrück (Ellermeier & Hellbrück, 1998) ou Jahncke et coll. (Jahncke et al., 2013), les participants peuvent donner leurs réponses dès la fin de la présentation du dernier item. La comparaison entre les résultats de ces expériences peut donc être complexe et délicate.

Enfin, il semblerait que les capacités des participants lors d'une tâche de sériation sont extrêmement variables. Par exemple, au sein d'une expérience récente (Ebissou et al., 2015), aucun effet de l'intelligibilité (le STI variait de 0.25 à 0.65) sur le décrétement de performance n'a pu être observé pour 32 personnes parmi 57 participants. Les performances globales de ces 32 participants étaient par ailleurs nettement meilleures que pour les autres sujets de l'expérience. Les capacités de la mémoire de travail étant très variables d'un individu à l'autre (Daneman & Carpenter, 1980), le nombre d'items à mémoriser lors de l'expérience peut avoir un impact sur les performances des participants. Si le nombre d'items à mémoriser est faible par rapport à la capacité mnésique du participant, celui-ci réalisera une

excellente performance quelle que soit la condition sonore. Au contraire, si le nombre d'items à mémoriser est grand par rapport à la capacité mnésique du participant, celui-ci réalisera des performances variables selon les variations d'intelligibilité.

Pour cette raison, un second objectif de l'expérience était de tester l'hypothèse selon laquelle l'adaptation de la tâche aux capacités mnésiques de chaque participant peut réduire la variabilité interindividuelle du décrement de performance. Cette adaptation consistera à choisir le nombre d'items à mémoriser en fonction de l'empan mnésique de chaque sujet.

3.2. Méthodologie

3.2.1. Dispositif expérimental

L'expérience consiste à évaluer la gêne sonore au moyen d'une tâche répétée de mémoire sérielle pour différentes conditions sonores. Elle se déroule dans la cabine audiométrique du Laboratoire Vibration et Acoustique (LVA) de l'INSA Lyon. Cette cabine est construite sur le principe de « boîte-dans-la-boîte » pour avoir une meilleure isolation acoustique vis-à-vis des bruits à l'extérieur de la salle (figure 3.1).

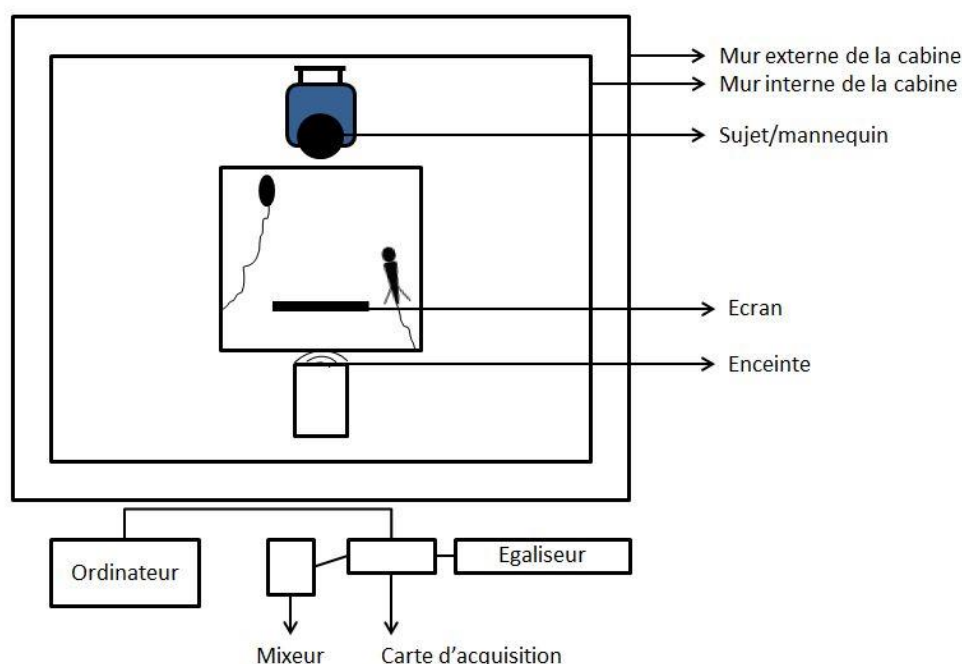


Figure 3.1. Schéma de la cabine d'audiométrie utilisée pour l'expérience (vue de dessus)

À l'intérieur de la cabine, le sujet est assis sur une chaise devant une table sur laquelle sont posés un écran et une souris, reliés à l'ordinateur pilotant l'expérience. L'ordinateur est placé à l'extérieur de la salle. La distance entre l'écran et la tête du sujet est d'environ 0,45 m. Une enceinte (Tapco S8) est

posée en face du sujet/derrière l'écran à une hauteur plus grande que celle de ce dernier (environ 1 m) et à une distance d'environ 0,7 m du sujet. Un microphone est posé sur la table à côté de l'écran. Ce microphone est utilisé pour enregistrer les réponses données par le sujet à haute voix. Le sujet passe trois quarts du temps à réaliser les tâches et les questionnaires en interaction avec l'écran et la souris. Le reste du temps comporte des échanges oraux entre le sujet et l'expérimentateur.²

Une égalisation en tiers d'octave de la salle est nécessaire pour pouvoir avoir une réponse en fréquence relativement plate à la position du sujet. Cette égalisation est faite à l'aide d'un égaliseur numérique Behringer ULTRA-CURVE PRO DSP8024. La figure 3.2 montre le spectre en tiers d'octave d'un bruit rose mesuré par un mannequin acoustique à la position du sujet, avant et après l'égalisation.

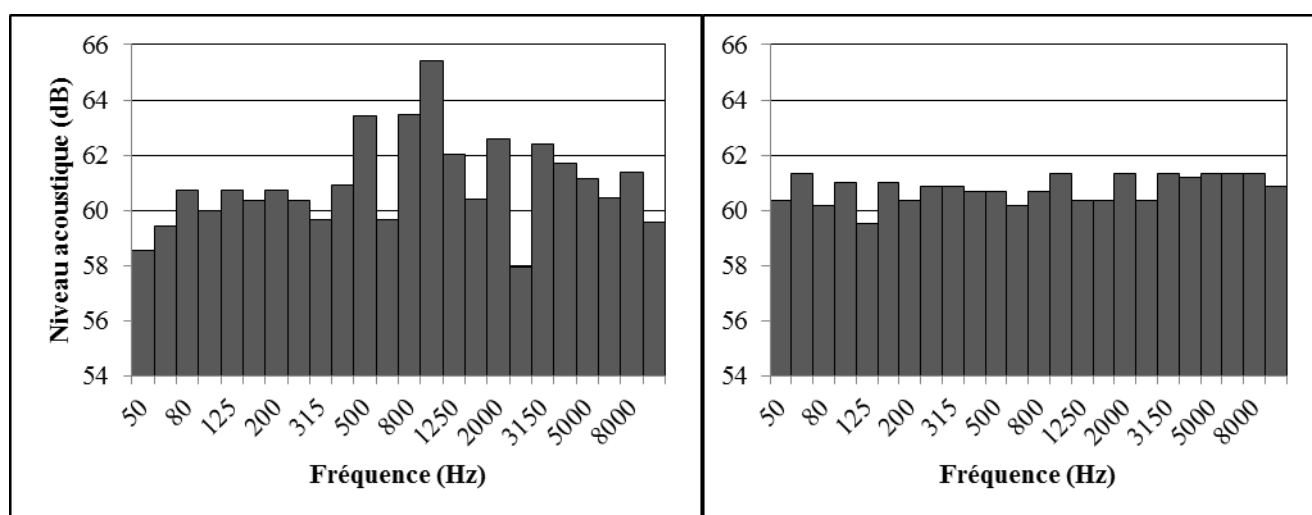


Figure 3.2. Spectre d'un bruit rose à la position d'écoute avant (gauche) et après (droite) l'égalisation.

3.2.2. Participants

Cinquante-cinq personnes, 26 femmes et 29 hommes, ont participé à cette expérience. L'âge médian était de 43 ans, dans une plage 25 – 59 ans et l'âge moyen de 41 ans. Toutes les personnes étaient informées de la nature et de la durée de cette expérience. Elles ont toutes passé un test d'audiométrie pour évaluer leurs pertes auditives éventuelles. On utilise pour cela un casque de mesure audiométrique (Oscilla USB-300 Screening Audiometer). Selon les recommandations de BIAP (Bureau International d'Audiophonologie) les pertes auditives se calculent comme la moyenne des pertes pour les octaves de 500 Hz à 4000 Hz (consulter la page web <https://www.biap.org/fr/>) . En considérant la meilleure oreille

² Ces tâches et questionnaires sont explicités dans la suite.

de chaque sujet, 45 sujets ne présentent pas de pertes auditives et sont considérés comme des normo-entendants. 6 personnes ont une perte auditive comprise entre 22 et 25 dB et 4 personnes ont une perte auditive entre 30 et 35 dB. Selon les recommandations du BIAP ces individus représentent plutôt une déficience auditive légère. Pour eux, « la parole est correctement perçue à voix normale, difficilement perçue à voix basse ou lointaine et la plupart des bruits familiers sont perçus ». Pour cette expérience aucun sujet n'a été considéré comme ayant une perte auditive importante pouvant remettre en cause sa participation. De ce fait, toutes les mesures des cinquante-cinq sujets ont été retenues.

3.2.3. Phase préliminaire

Avant de commencer l'expérience sur l'évaluation de la gêne sonore, le sujet doit passer par une phase préliminaire comprenant plusieurs tâches et questionnaires. Cette phase se déroule à l'intérieur de la cabine d'audiométrie et dure environ 40 minutes.

Après l'audiométrie tonale présentée ci-dessus, l'expérimentateur note quelques informations d'ordre général au travers du questionnaire représenté sur la figure 3.3. Ce questionnaire servira à s'assurer que le sujet se trouve dans des conditions satisfaisantes pour pouvoir participer à l'expérience.

Après ce questionnaire, le sujet passe sa première tâche avec l'expérimentateur. Cette tâche, appelée tâche d'EMPAN (Wechsler, 2010; Wilde, Strauss, & Tulskey, 2004), consiste à évaluer la capacité maximale du sujet à retenir un certain nombre d'éléments et à les restituer immédiatement après les avoir entendus. On appellera *EMPAN mnésique du sujet* ce nombre maximal d'éléments retenus. Cette tâche se passe en deux étapes :

- Premièrement, l'expérimentateur énonce des séries de chiffres à haute voix en augmentant le nombre de chiffres toutes les deux séries (en commençant par des séries de deux chiffres). Chaque série n'est dite qu'une seule fois. Le sujet doit répéter la série de chiffres exactement dans leur ordre de présentation. Le test se termine quand le sujet fait deux erreurs dans deux séries consécutives ayant le même nombre de chiffres. Cette étape consiste à évaluer les capacités de mémoire immédiate du sujet.
- Deuxièmement, l'expérimentateur énonce à nouveau des séries de chiffres en appliquant le même principe que dans la première étape, mais cette fois-ci le sujet doit répéter les chiffres dans l'ordre inverse dans lequel ils ont été présentés. La condition d'arrêt est la même que dans la première étape. Cette étape consiste à évaluer la mémoire de travail du sujet.

L'EMPAN mnésique du sujet est égal au nombre maximal de chiffres correctement restitués dans la deuxième étape. La première étape sert seulement à habituer le sujet à la tâche.

No. Sujet :	Sex e :
Age :	Droitier(e) / Gaucher(e)
Fumer : Oui Non	
Question : Avez-vous pris un café l'heure avant de venir ?	
Question : Avez-vous besoin de lunettes pour lire un écran ?	
Question (après-midi): Avez-vous bu de l'alcool avant de venir ?	

Figure 3.3. Questionnaire de début d'expérience.

Ensuite, le sujet doit réaliser différentes épreuves informatisées. Pour chaque tâche ou questionnaire, une fenêtre apparaît à l'écran. Cette fenêtre est blanche et le texte est écrit en noir. Avant de commencer, une consigne indique au sujet la procédure à suivre pour chaque étape. Tout au long de l'expérience, l'expérimentateur reste dans la pièce avec le sujet pour s'assurer qu'il a bien compris ce qu'il doit faire.

La première tâche informatisée est celle de STROOP (Meulemans, 2008; Stroop, 1935), qui consiste à évaluer la sensibilité du sujet à l'effet d'interférence, effet d'interférence produit par une information non-pertinente au cours de l'exécution d'une tâche cognitive. Ce test se déroule en trois temps. Les consignes apparaissent à l'écran au début de chaque étape, décrite ci-dessous :

- Premièrement, un nom de couleur (soit rouge, soit bleu, soit vert) et trois boutons reprenant les trois possibilités sont présentées. Le sujet doit cliquer le plus rapidement possible sur le bouton correspondant au nom qui s'est affiché. Cette action est répétée plusieurs fois successivement.
- Deuxièmement, des carrés de couleurs (rouge, vert, bleu) s'affichent à l'écran, les uns après les autres, à côté des trois cases reprenant les trois possibilités. Le sujet doit cliquer le plus rapidement possible sur la case qui correspond à la couleur du carré.
- Troisièmement, un nom de couleur (soit rouge, soit bleu, soit vert) écrit dans une couleur (soit rouge, soit bleu, soit vert) qui peut être différente du nom, et trois boutons reprenant les trois possibilités sont présentés à l'écran. Le sujet doit cliquer le plus rapidement possible sur le bouton qui correspond à la couleur dans laquelle le mot est écrit.



a) Etape 1



b) Etape 2



c) Etape 3

Figure 3.4. Les trois étapes de la tâche de STROOP présentées à chaque sujet. Dans cet exemple illustré, la réponse correcte pour les trois étapes est 'VERT'.

La figure 3.4 illustre les trois étapes de cette tâche. À la fin de chaque étape, le temps de réaction, le temps total et le nombre d'erreurs sont enregistrés. Deux indicateurs sont déduits : celui d'interférence faible et celui d'interférence forte.

Ensuite, le sujet remplit deux questionnaires. L'expérimentateur entre dans la cabine au début et à la fin de chaque questionnaire.

- Le premier questionnaire, appelé échelle de Levenson (Jutras, 1987), consiste à évaluer si le sujet est facilement gêné par des perturbations externes lorsqu'il mène une tâche demandant de la concentration. Ce questionnaire contient 24 phrases affirmatives qui demandent au sujet d'indiquer son accord, en cliquant sur une des six options graduelles (commençant par « Tout à

fait en désaccord » et finissant par « Tout à fait d'accord »). Il est demandé au sujet de répondre le plus sincèrement possible.

- Le deuxième questionnaire, appelé questionnaire de Thayer (Thayer, 1978; Robert E Thayer, 1986), consiste à évaluer l'état psychophysiologique (et plus particulièrement le niveau de vigilance et le niveau de tension) du sujet au moment de l'expérience, grâce à vingt adjectifs. Le sujet doit définir son état par rapport à chacun des adjectifs, en cliquant sur une des quatre options graduelles comprenant « Je me sens très... » », « Je me sens un peu... », « Je ne sais pas » et « Je ne me sens pas du tout... ». Chaque modalité de réponse est associée à un score allant de 4 à 1 (dans le sens de présentation des réponses donné ci-dessus). Ce questionnaire est répété à la fin de chaque étape de l'expérience.

3.2.4. Expérience

Après avoir passé la phase préliminaire, le sujet commence l'expérience qui consiste à évaluer la gêne sonore au cours d'une tâche de mémoire à court-terme. L'expérimentateur explique oralement la tâche qui sera répétée plusieurs fois pendant l'expérience : il s'agira de mémoriser des mots présentés visuellement, puis de les restituer oralement. Ensuite, il illustre ses indications avec deux exemples sur l'écran. Cette phase de démonstration de la tâche peut se répéter plusieurs fois si le sujet n'a pas compris ce qu'il doit faire. Après cette habitude du sujet à la tâche, l'expérimentateur lance la procédure décrite dans la suite de cette partie.

3.2.4.1. Protocole expérimental

Comme précédemment, une consigne rappelle le contenu de la tâche de mémoire. Après la consigne, une croix, appelée croix de fixation, apparaît au centre de l'écran pendant 3 secondes. Cette croix est suivie d'une liste de mots qui apparaissent un par un et que le sujet doit mémoriser. Les mots sont écrits en noir sur un fond blanc, avec la police « Helvetica » de taille 64. Chaque mot reste à l'écran pendant 1 seconde. L'enchaînement des mots se fait sans temps mort. Quand la liste est terminée, l'écran reste blanc pendant 3 secondes. On appelle ce blanc « phase de rétention », pendant laquelle le sujet doit retenir les mots précédemment affichés à l'écran. Quand « C'est à vous » à l'écran apparaît, le sujet doit restituer à haute voix le nombre maximum de mots dont il se souvient, sans ordre précis. Le texte « C'est à vous » reste affiché pendant 15 secondes correspondant au temps maximal alloué au sujet pour répéter les mots dont il se souvient. Aucun retour d'information n'est fait au participant.

Le sujet est confronté à 16 séries de mots lors de chacune des cinq phases de l'expérience. Une phase correspond à une condition sonore particulière. Pour chaque phase, on teste deux conditions de coûts cognitifs différents (figure 3.7 et 3.8) :

- Un coût cognitif élevé, correspondant à une liste de mots plus longue que l'EMPAN mnésique maximal du sujet. Dans notre cas, si l'empan mnésique du sujet est de n , alors la liste affichée à l'écran pendant la tâche avec un coût cognitif élevé aura $n+2$ mots.
- Un coût cognitif faible, consistant à avoir une liste de mots plus courte que l'EMPAN mnésique maximal du sujet. Dans notre cas, pour un empan mnésique de n , la liste affichée à l'écran pendant la tâche avec un coût cognitif faible aura $n-1$ mots.

Pour chaque condition sonore (appelée ici *phase*), le sujet doit accomplir huit essais avec $n+2$ mots (coût cognitif élevé) et huit essais avec $n-1$ mots (coût cognitif faible). L'ordre de ces seize essais est aléatoire. Les listes de mots sont choisies dans les listes lexicales de D. Dubois et J. Poitou (Dubois & Poitou, 2002). Les catégories utilisées au cours de cette expérience sont : Animaux, Boissons, Bâtiments, Meubles et Sports. Chacune des catégories contient trente mots, choisis en fonction de la fréquence d'utilisation dans le langage courant. Une catégorie est utilisée pour une phase. L'ordre des catégories de mots est différent pour chaque phase correspondant à une condition sonore pour chaque sujet.

3.2.4.2. Stimuli sonores et questionnaires

Quatre phases de l'expérience se déroulent en présence de bruit pour lequel le signal de parole est plus ou moins intelligible. Ces signaux sont présentés au sujet à un niveau acoustique d'environ 55 dB(A), valeur qui correspond au niveau acoustique moyen mesuré par l'INRS dans les bureaux ouverts pendant le projet ANSES GABO (Pierrette et al., 2015).

Les signaux de cette expérience sont composés d'un bruit de « brouhaha » stationnaire et d'une parole parfaitement intelligible. Le « brouhaha stationnaire » est créé en sommant des voix, ayant toutes le même niveau moyen.

Ensuite, les signaux de parole intelligible ont été pris dans une base de données gratuite de livres audio sur internet (consulter la page web <http://www.litteratureaudio.com/>). Quatre narrateurs, deux hommes et deux femmes ont été choisis en fonction de la qualité de l'enregistrement. Ensuite, ces signaux ont été coupés et nettoyés d'éventuels bruits parasites ou de défauts d'enregistrement. Les longues pauses des quatre narrateurs au cours de sa lecture ont aussi été supprimées.

Afin d'éviter les problèmes éventuels de format de fichiers audio, tous les fichiers ont été convertis au format .wav. Une procédure de traitement du signal a finalement été appliquée pour, in fine, obtenir des signaux d'une durée de 9 minutes pour chaque narrateur. Cette procédure est la suivante :

Premièrement, une égalisation par bandes d'octave est appliquée aux signaux (parole et brouhaha) pour obtenir le spectre moyen de la parole de longue durée (LTASS) selon la norme ISO 3382-3 (ISO). Deuxièmement, une normalisation par rapport à la moyenne quadratique rms (root mean square) est appliquée à chaque fichier .wav. Le signal de parole de chaque narrateur et le brouhaha sont ensuite

sommés pour différents rapports signal/bruit de sorte à obtenir les valeurs de STI 0,25 ; 0,45 ; 0,75 ; 0,9 (figure 3.5). Ceci est possible dans la mesure où les spectres par bandes d'octave du signal de parole et du brouhaha sont identiques. Dans cette procédure de calcul du STI, on néglige l'effet du masquage fréquentiel.

Les seize signaux créés (quatre narrateurs × quatre conditions sonores avec les valeurs de STI de l'expérience) sont finalement normalisés pour avoir la même valeur de pression acoustique efficace en sortie de traitement.

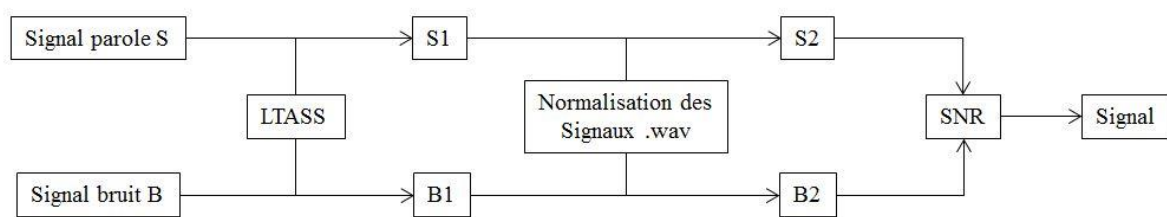


Figure 3.5. Procédure de création des signaux de l'expérience.

Enfin, ces signaux ont été restitués à la position du sujet à un niveau d'environ 55 dB(A).

Pour chaque phase, un des seize signaux de 9 minutes est utilisé. La permutation de ces signaux est faite sur le principe d'un carré latin (4x4), expliqué dans la suite de cette partie.

Pendant l'expérience, le sujet est soumis à cinq conditions sonores différentes, dont une condition de silence, qui sert de condition de contrôle.

Pour chaque condition, l'ambiance sonore commence dès la dernière seconde de l'apparition de la croix de fixation et finit après la dernière seconde de l'écran blanc, avant l'apparition de « C'est à vous ». Les participants restituent les mots dans le silence.

L'ordre de passage des phases est différent pour chaque sujet. Cet ordre est basé sur un carré latin, afin de limiter les effets d'ordre liés à la source sonore. Un carré latin (5x5) est un tableau carré de cinq lignes et de cinq colonnes remplies de cinq éléments distincts dont chaque ligne et chaque colonne ne contient qu'un exemplaire (figure 3.6). En permutant une ou plusieurs colonnes, un nouveau carré latin (5x5) est obtenu.

En considérant chaque item du carré latin comme une représentation de chaque phase, pour avoir un plan équilibré, il faut que le nombre de sujets soit un multiple du nombre de phases. Pour cette expérience cinquante-cinq sujets ont enchaîné les phases avec un ordre différent. Cinquante-cinq sujets ont été répartis dans 11 carrés latins différents.

0	1	2	3	4
1	2	3	4	0
2	3	4	0	1
3	4	0	1	2
4	0	1	2	3

1	0	2	4	3
2	1	3	0	4
3	2	4	1	0
4	3	0	2	1
0	4	1	3	2

Figure 3.6. Carré latin (5x5) avant (gauche) et après (droite) la permutation des colonnes 1,2 et 4,5.

Ensuite, à la fin de chaque phase, l'expérimentateur entre dans la cabine pour demander au participant si la tâche a été perçue comme difficile et, en cas de réponse positive, pourquoi le participant a ressenti cette difficulté. Cette intervention permet aussi au sujet de faire « une pause » entre chaque phase. Après cette intervention, le sujet doit répondre à trois questionnaires en pensant à la phase de l'expérimentation qui vient de se dérouler. Ces questionnaires sont présentés au sujet à l'aide d'une interface graphique et dans l'ordre suivant :

- Le premier questionnaire consiste à évaluer la gêne sonore en posant simplement la question : « Avez-vous été perturbé(e) par le bruit ? » (S. Schlittmeier, J. Hellbrück, R. Thaden, & M. Vorländer, 2008). La réponse se fait sur une échelle visuelle analogique.
- Le deuxième questionnaire, appelé NASA-TLX, consiste à évaluer la charge de travail à travers cinq questions portant sur l'exigence mentale, l'exigence temporelle, la performance, l'effort fourni et la frustration (Brocolini et al., 2016; Sandra G. Hart, 2006).
- Le troisième questionnaire est celui de Thayer (Thayer, 1978; Robert E Thayer, 1986) déjà complété par le sujet avant le début de l'expérience.

Pour la phase en condition de silence, la question sur la gêne sonore n'est bien sûr pas présentée.

3.2.4.3. Durée de l'expérience

Pour s'assurer que le décrétement de performance observé est bien lié à l'environnement sonore et non à une possible baisse de vigilance des sujets, la durée de l'expérience sur la gêne sonore choisie est d'environ 45 minutes. Ce temps dépend, dans notre cas, de l'EMPAN mnésique du sujet, car cette valeur décide des longueurs de listes de mots pour chaque condition de coût cognitif et donc, de la durée de chaque phase.

En effet, supposons que le sujet ait un EMPAN mnésique égal à 8. Cette valeur correspond au maximum de l'EMPAN mnésique que l'on peut rencontrer (Wechsler, 2010). Avec cette valeur, chaque phase contient des essais avec des listes de 10 (coût cognitif élevé $n+2$) ou 7 (coût cognitif faible $n-1$) mots. Sachant que la croix de fixation reste à l'écran pendant 3 secondes, les mots s'affichent pendant 1 seconde chacun (7 ou 10 secondes par liste), la phase de rétention dure 3 secondes et que le sujet a 15 secondes pour restituer les mots, la durée de l'essai selon la condition de coût cognitif est

respectivement 4 minutes 8 secondes (élevée) ou 3 minutes 44 secondes (faible). Pour chaque tâche, le sujet est soumis à une ambiance sonore choisie aléatoirement dans les signaux de 9 minutes, soit pendant 14 secondes, soit pendant 11 secondes. La durée totale maximale par phase est de 7 minutes 52 secondes. Finalement, pour les 5 phases, la durée maximale de l'expérience est d'environ de 50 minutes, en incluant le temps des questionnaires entre chaque étape, qui est considéré plutôt comme un temps de repos pour le sujet.

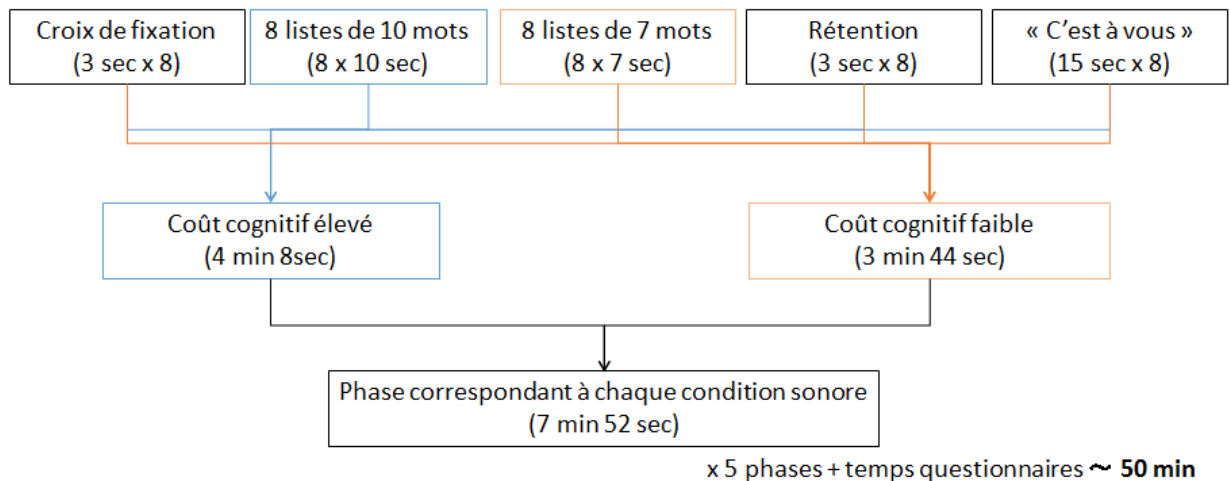


Figure 3.7. Schéma de la procédure pour chaque phase (chaque condition sonore)

Finalement, sur la figure 3.8 sont présentées toutes les étapes du protocole de la phase préliminaire et de l'expérience sur la gêne liée au bruit de parole. Les flèches montrent l'ordre des tests et des phases passées par le sujet dès son arrivée.

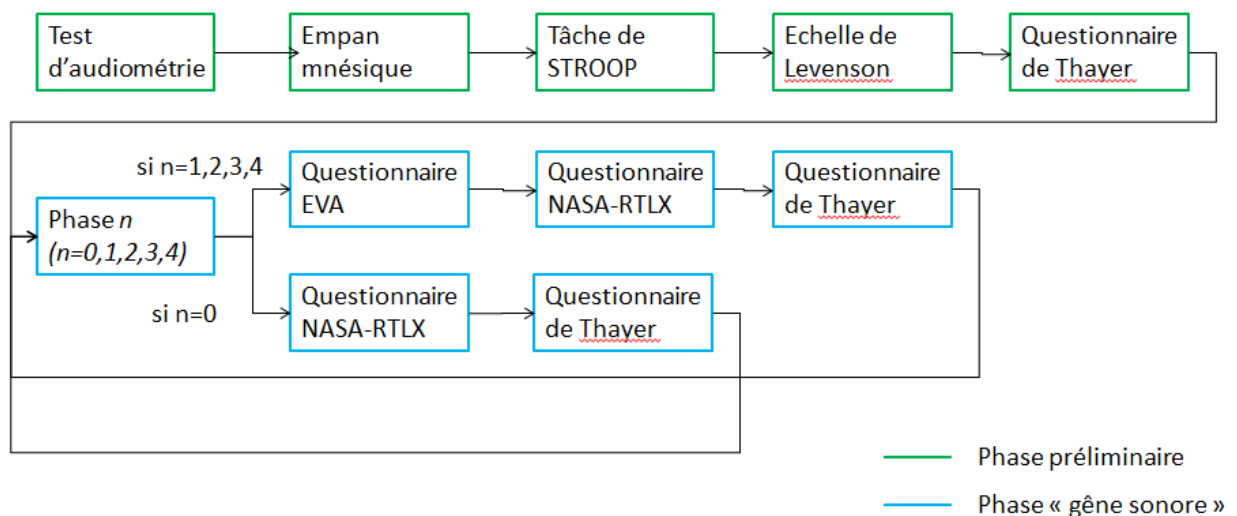


Figure 3.8. Schéma de la procédure totale de l'expérience

3.3. Résultats

Les analyses statistiques ont été menées à l'aide du logiciel STATA14.

Les participants ayant été confrontés plusieurs fois à la même tâche dans des conditions sonores différentes, nous sommes en présence de groupes appariés justifiant l'utilisation d'ANOVA à mesures répétées pour analyser les résultats de cette étude. Les variables dépendantes prises en compte pour ces analyses sont : la mesure objective du décrétement de performance, la mesure subjective de l'augmentation de la charge de travail et la gêne sonore ressentie. Ces trois mesures ont été analysées en fonction des conditions sonores. Des analyses ont également été conduites sur le niveau de vigilance en fonction du moment de passation du test.

De plus, des analyses de corrélation entre les mesures de l'ISE (subjectives et objectives), l'indice d'interférence IF (tâche de STROOP) et l'internalité de LOC ont été réalisées. Précisons d'emblée que ces corrélations ne montrent pas de résultats significatifs.

3.3.1. Résultats globaux

Pour le test de l'empan mnésique, les participants ont obtenu en moyenne un empan mnésique de 4,3 (1 participant avec un empan de 2, 11 participants avec un empan de 3, 19 participants avec un empan de 4, 21 participants avec un empan de 5, 2 participants avec un empan de 6 et 1 participants avec un empan de 7). A titre de comparaison, l'étude de Orsini et coll. (Orsini et al., 1987) réalisée verbalement avec 1355 participants adultes donne une moyenne de 5,3 avec un écart-type de 1. Les résultats obtenus lors de cette expérience semblent être dans la plage de variation retrouvée dans l'étude de Orsini et coll.

3.3.1.1. Décrétement de performance

La performance est calculée à partir des réponses enregistrées des participants (Brocolini et al., 2016; Ebissou et al., 2015) :

$$Performance = 100 \times \left(\frac{Nombre\ de\ mots\ correct - Nombre\ de\ mots\ faux}{Nombre\ total\ de\ mots} \right)$$

Le décrétement de performance est obtenu en appliquant la relation donnée par Hongisto, 2005. L'effet d'ordre de passage de chaque condition a été analysé également. Par exemple, dans le cas de la condition de silence, les participants sont séparés en cinq groupes de 11 selon l'ordre de passation de la condition de silence (ceux qui avaient la condition de silence en premier, ceux qui avaient la condition de silence en deuxième, etc.). Ensuite, des tests de comparaison de moyenne entre les performances des cinq groupes ont été faits. Aucun résultat ne montre un effet d'ordre de passage de la condition de

silence. La même procédure a été appliquée pour les quatre autres conditions et aucun résultat ne permet de mettre en évidence un effet d'ordre de passage.

Sur la figure 3.9 est représenté le DP en fonction des valeurs de STI obtenues lors de l'expérience. Chaque point est accompagné par un intervalle de confiance à 95 %. On remarque que pour une forte intelligibilité (STI=0,9) la valeur du DP n'augmente pas, mais il y a un effet global du STI sur le DP ($F(3,159) = 4,32$ $p = 0,0059$). Cet effet global confirme les résultats trouvés dans la littérature pour les expériences présentées sur la figure 2.2.

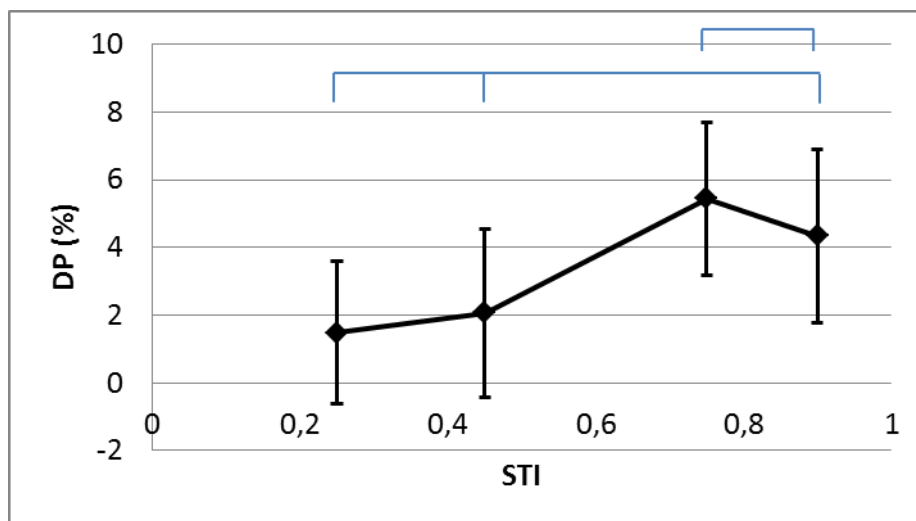


Figure 3.9. Décrément de performance en fonction du STI, accompagné de l'intervalle de confiance à 95%.

Le classement de Tukey (test post-hoc) est représenté par des barres horizontales sur la figure 3.9. Les conditions reliées par ces barres ne sont pas significativement différentes. Ce classement montre une différence significative entre la troisième condition sonore (STI = 0,75) et les deux premières conditions, mais il n'y a pas de différence significative entre le DP pour un STI=0,9 et le DP pour un STI=0,25 ou de 0,45. Les valeurs de DP pour une grande intelligibilité (0,75 et 0,9) ne sont pas significativement différentes entre elles. Ce résultat rejoint ceux de (Jahncke et al., 2013) et de (Brocolini et al., 2016) qui montrent que le DP pour la valeur maximale de STI considérée, n'est pas significativement différente des valeurs qui se trouvent dans la zone de STI entre 0,2 et 0,4.

Ces résultats ne mettent donc pas en évidence que le choix de la valeur de STI = 0,5 pour calculer une distance de distraction est cohérent avec les effets de l'intelligibilité de la parole sur le DP. La norme indique que pour un STI inférieur à 0,5 le DP décroît rapidement. Or, lors de cette expérience il n'y a pas de différence significative entre les différentes conditions sonores pour un STI de 0,25, 0,45 et 0,9. Le choix de cette valeur cible reste encore à consolider.

Notons également que le fait qu'il n'y ait pas de différence significative entre ces trois valeurs ne permet pas de vérifier l'hypothèse d'une relation linéaire entre le STI et le DP. Il semblerait que nos résultats ne remettent pas en cause le plateau de Hongisto.

3.3.1.2. *Augmentation de la charge de travail*

La charge de travail est obtenue à partir des scores exprimés par les sujets sur le questionnaire NASA-RTLX. De la même façon que pour le décrétement de performance, l'effet du bruit peut être déterminé en retranchant l'évaluation de la charge de travail réalisée dans le silence à celle obtenue pour chaque condition de bruit. Les valeurs moyennes de l'augmentation de la charge de travail mesurées sur les participants en fonction du STI sont présentées sur la figure 3.10, accompagnées de leur intervalle de confiance à 95%. La courbe montre que la charge de travail augmente avec l'intelligibilité de façon significative ($F(3,159) = 4,44$ $p = 0,005$).

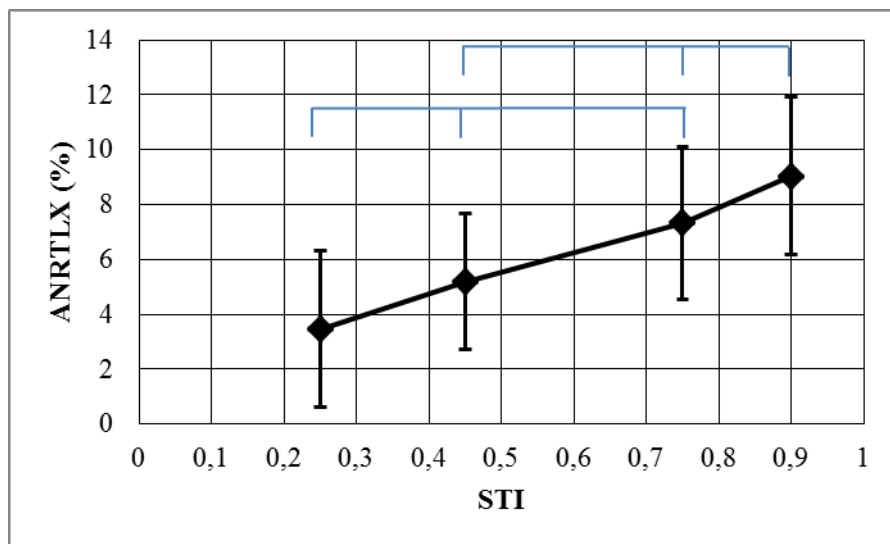


Figure 3.10.Augmentation de NASA-RTLX en fonction du STI

Un classement de Tukey, montré par les barres horizontales sur la figure 3.10 permet de mettre en évidence une différence significative entre la première et la dernière condition sonore. Par contre, il n'y a pas de différence entre les conditions sonores voisines. Ces résultats de l'analyse statistique nous montrent le même effet global retrouvé par Ebissou et coll. (Ebissou et al., 2015). Cet effet semble être linéaire, contrairement au DP.

3.3.1.3. Gêne sonore ressentie

Comme pour la charge de travail, la gêne sonore est subjectivement évaluée pour chaque condition sonore au moyen d'une seule question simple sur une échelle de Likert. Sur la figure 3.11 est présentée la courbe du score de gêne ressentie en fonction des conditions de STI. Il est à noter sur cette courbe que les valeurs moyennes de la gêne pour les deux premières conditions sont distinctes des valeurs moyennes des deux suivantes. Une ANOVA sur ces valeurs montre un effet significatif de l'augmentation du STI sur la gêne sonore ressentie ($F(3,159) = 7,58$ $p = 0,0001$). De plus, le classement de Tukey, présenté par les barres horizontales sur la figure 3.11, indique une différence significative entre les deux premières et les deux dernières conditions de STI. Ce résultat confirme l'effet du STI sur l'évaluation subjective de la gêne qu'obtiennent Schlittmeier et coll. (S. J. Schlittmeier et al., 2008).

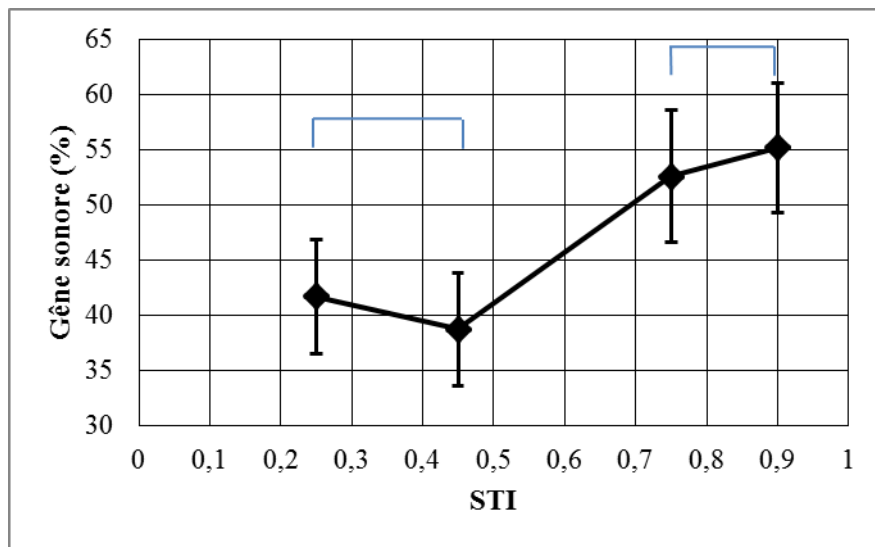


Figure 3.11. Scores de gêne sonore ressentie en fonction du STI

Les valeurs données sur la figure 3.11 ne sont pas normalisées par la condition de silence. La question « Avez-vous été gêné par le bruit ? » perd son intérêt pour une condition de silence.

Les résultats retrouvés lors de cette expérience rejoignent ceux de Schlittmeier et coll. (S. J. Schlittmeier et al., 2008) et ceux de Liebl et coll. (Liebl et al., 2016). Cet indicateur qui donne un score de la gêne ressentie due à l'ambiance sonore se comporte de la même façon dans les trois études. Pour des valeurs de STI entre 0,2 et 0,6 le score de la gêne sonore n'est pas significativement différent. De plus, quand l'intelligibilité est très forte les trois études montrent une gêne sonore ressentie qui augmente significativement.

3.3.1.4. *Vigilance*

La dernière mesure effectuée durant ces travaux est celle de la vigilance des participants au début et en cours d'expérience. Cette mesure permet d'identifier d'éventuels effets de « fatigue » que les participants subissent au cours de l'expérience. Pour ce faire, le questionnaire de Thayer est utilisé. Ce questionnaire est passé au début et après chaque condition sonore. Pour s'assurer que l'heure à laquelle débute l'expérience n'affecte pas les résultats, une ANOVA a été réalisée sur les résultats au premier test passé avant de commencer la tâche de sériation. Les participants ont été séparés en trois groupes selon l'heure de la passation du premier test de vigilance (10h, 14h ou 16h). L'analyse montre qu'il n'y a pas de différence significative entre les moments de la journée ($F(2,53) = 0,44$ $p = 0,6491$). De même, il n'y a pas d'effet significatif des conditions sonores sur la vigilance ($F(4,212) = 0,76$ $p = 0,5509$). Sur la figure 3.12 est représenté le niveau moyen de vigilance (qui peut varier entre 1 et 4) en fonction des différents moments de l'expérience. Le moment initial est avant le commencement de l'expérience et le moment 5 est après la dernière condition sonore. On note que la vigilance baisse au cours du temps. Une ANOVA à mesures répétées permet de mettre en évidence un effet significatif du temps sur la vigilance des participants ($F(5,265) = 4.43$ $p < 0,001$).

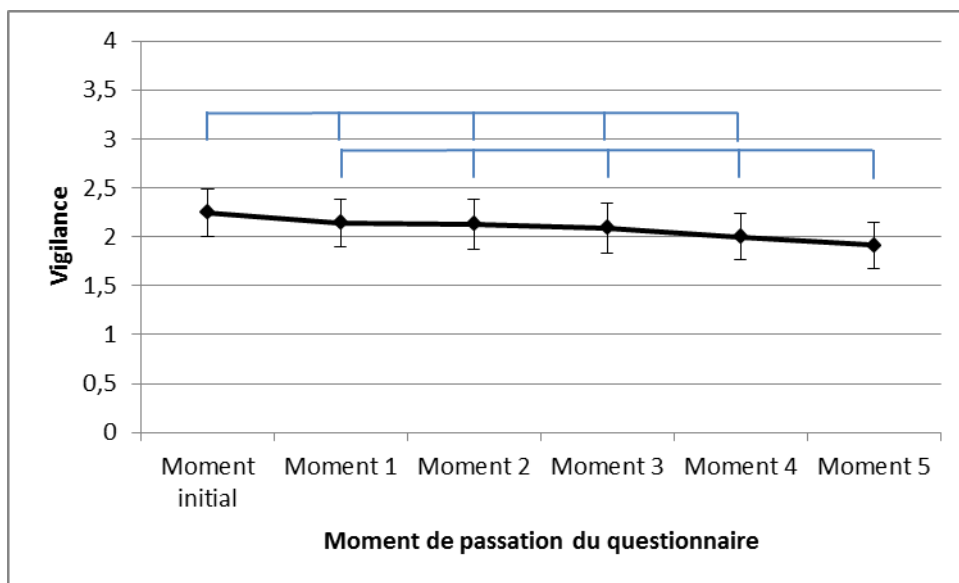


Figure 3.12. La note de vigilance en fonction de l'ordre de passage du questionnaire de Thayer

Un classement de Tukey représenté par les barres horizontales sur la figure 3.12 montre qu'il existe une différence significative entre le premier test passé avant le début de l'expérience et le dernier.

3.3.2. Résultats selon les groupes de participants

Le deuxième objectif de cette expérience est l'adaptation individuelle de la tâche en vue d'une réduction de la variabilité individuelle du décrement de performance. Cette adaptation consiste à choisir le nombre de mots à mémoriser en utilisant les mesures de l'empan mnésique de chaque participant. Lors de l'expérience, ce choix est fait pour que chaque participant passe la tâche avec un coût cognitif faible et un coût cognitif élevé. De cette façon le décrement de performance est mesuré dans deux conditions, plus ou moins coûteuses cognitivement pour les participants. Les résultats de l'ANOVA ne montrent pas de différence significative du décrement de performance en fonction du coût cognitif ($F(1,53) = 2,11$ $p = 0,1497$). En revanche, l'adaptation de la tâche selon les capacités mnésiques de chaque participant peut réduire la variabilité interindividuelle du score de la performance brute. On s'attend donc à des performances individuelles assez uniformes. L'analyse des données montre que cela est bien le cas pour la situation de coût cognitif faible : en dehors de 4 participants, les performances individuelles moyennes dans cette situation sont comprises entre 80 et 100 % (figure 3.13).

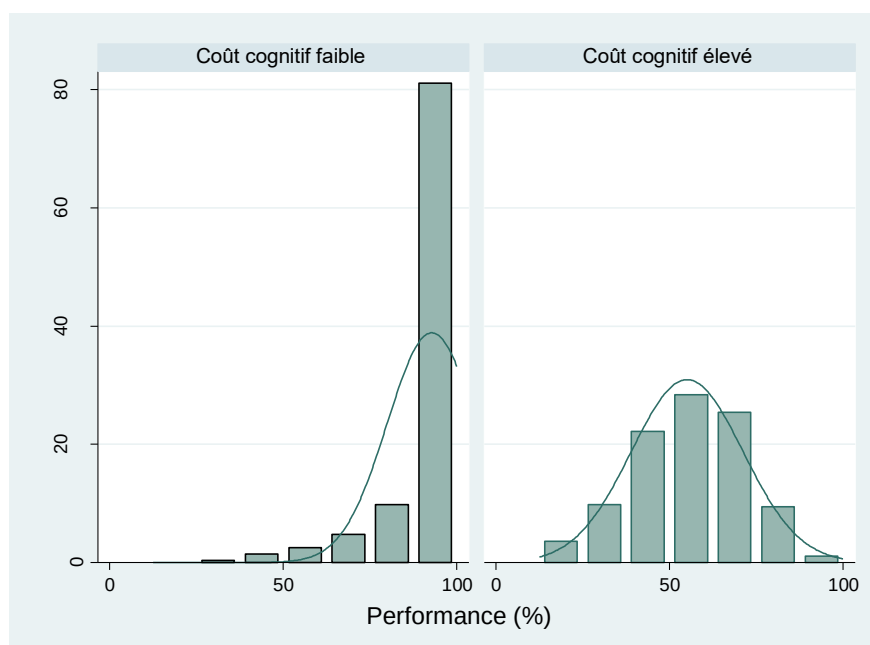


Figure 3.13.Distributions des valeurs de performance en fonction des deux coûts cognitifs pour toutes conditions sonores confondues.

En revanche, pour la situation de coût cognitif élevé, la variabilité interindividuelle est beaucoup plus importante, puisque les performances sont comprises entre 26% et 85 % (figure 3.13). Ces résultats sont proches des résultats retrouvés par Brocolini et coll. 2016 où, les performances sont comprises entre 30% et 77%. Cela signifie que l'individualisation de la tâche ne réduit pas la variabilité interindividuelle.

Pour vérifier si l'observation de cette performance moyenne se retrouve sur les performances dans les différentes situations, une classification hiérarchique ascendante des participants a été réalisée à partir des mesures de performances en situation de charge élevée dans les cinq conditions sonores (regroupement des classes par la méthode de Ward, figure 3.14). Cette classification fait apparaître deux groupes : le groupe 1 des « moins performants » (21 participants) et le groupe 2 des « plus performants » (34 participants).

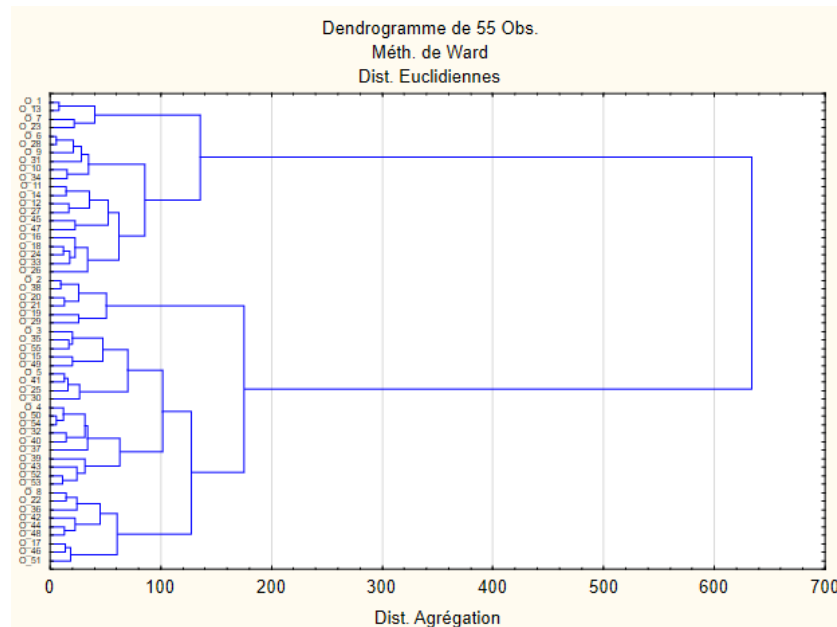


Figure 3.14. Classification hiérarchique des participants

L'observation des performances moyennes dans les deux groupes, selon les conditions sonores (figure 3.15), confirme qu'il s'agit bien d'une séparation en deux groupes de sujets selon leur niveau de performance général. Les performances moyennes des deux groupes sont de 41.6 % (groupe 1) et 63.4 % (groupe 2) pour cette condition de coût cognitif élevé. Notons que cette augmentation de performance du groupe 2 se retrouve dans la condition de charge faible, pour laquelle les performances moyennes sont de 86 % (groupe 1) et 97 % (groupe 2).

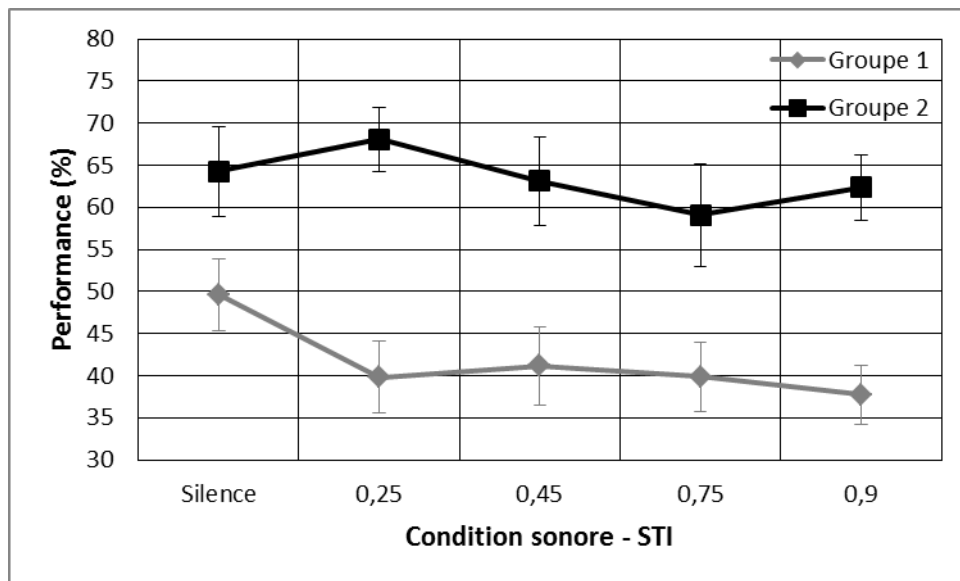


Figure 3.15. La performance du coût cognitif élevé en fonction des conditions sonores pour les deux groupes de participants.

Par ailleurs, cette catégorisation des participants en deux groupes selon leur niveau de performance a permis d'étudier le décretement de performance en fonction de ces deux groupes. La figure 3.16 représente le décretement de performance dans la condition de coût cognitif élevé et montre que le groupe 1 est moins performant que le groupe 2 quelle que soit la condition sonore. De plus, les conditions sonores n'ont pas d'effet sur les DP pour ce groupe 1. Ce décretement de performances est plus élevé que les moyennes globales (figure 3.16). Il varie entre 8 % (STI = 0,45) et 12 % (STI = 0,9) (écart de 4%). En revanche, pour le groupe 2, les variations du décretement de performance sont plus importantes. Elles se trouvent entre -4 % (STI = 0,25) et 5 % (STI = 0,75) (écart d'environ 9%). Ces résultats confirment, en partie, les résultats d'Ebissou et coll. (Ebissou et al., 2015). Comme pour notre étude, les moins performants (groupe 1) étaient sensibles à la présence du bruit lors de la tâche de sériation contrairement aux plus performants. En revanche, lors de cette étude, ce même groupe n'était pas sensible aux variations de l'intelligibilité car la tâche semblait être trop difficile pour eux (le groupe des moins performants). Or, le DP des plus performants (groupe 2) varie en fonction du STI.

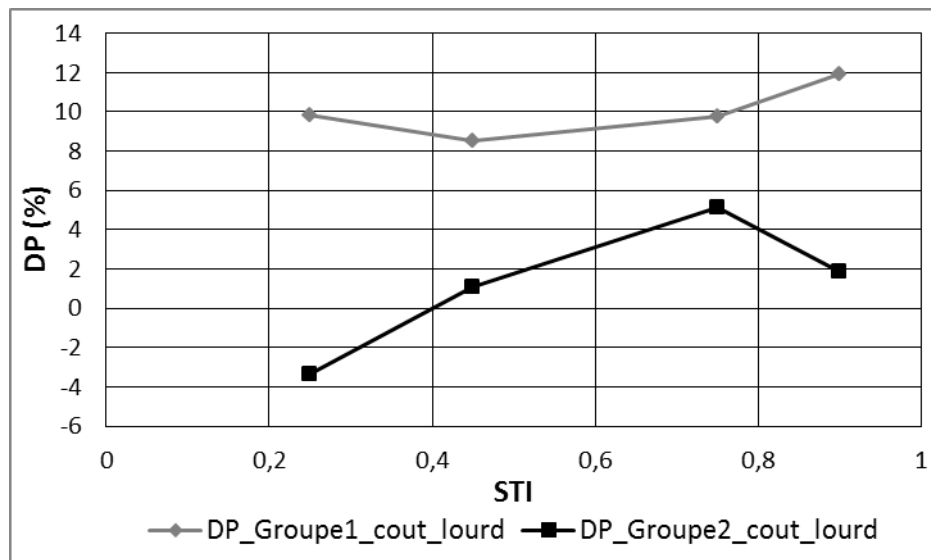


Figure 3.16. Décrément de performance en fonction du STI pour le premier groupe (en gris) et le deuxième groupe (en noir).

Les résultats obtenus dans cette étude ne semblent pas montrer de diminution de la variabilité interindividuelle même avec une tâche de sériation adaptée aux capacités mnésiques des participants. En effet, deux groupes d'auditeurs ont pu être constitués, selon leurs performances dans les différentes conditions sonores. Les résultats du test de l'empan mnésique montrent que les moyennes des valeurs d'empan sont respectivement 4.42 et 4.17 pour les deux groupes. La différence entre ces deux valeurs n'est pas significative (test de Mann-Whitney, $Z = 0,65$, $p > 0,5$). Cependant, il apparaît que les deux groupes présentent une nette différence d'âge moyen : 47.8 ans pour le groupe le moins performant (groupe 1), 37.8 ans pour le plus performant (groupe 2). Cette fois-ci, la différence des valeurs est significative (test de Mann-Whitney, $Z = 3,867$, $p = 0,0001$). Dans les études qui mettent en évidence un effet d'âge, la raison évoquée est la baisse des capacités d'inhibition (Bell et al., 2008; Meijer et al., 2006), plutôt qu'une baisse des capacités de mémorisation propre. Cela pourrait signifier que les participants qui font partie du premier groupe (avec un âge moyen plus élevé) ont davantage de difficultés à ignorer le bruit qui les entoure, lors de la tâche de sériation. Dans le cas présent, un déficit d'inhibition éventuel pourrait être évalué grâce à la sensibilité à l'effet d'interférence. En effet, nous pourrions considérer le bruit de la parole intelligible comme une information non-pertinente qui vient perturber les participants lors d'une tâche de mémoire de mots. Cependant, les résultats de la tâche de Stroop, qui mesure cette sensibilité à l'effet d'interférence (comme un rapport entre le temps de réaction de la phase d'apprentissage et le temps de réaction de la phase où l'effet d'interférence est présent), ne montrent pas de différence significative entre les deux groupes (test U de Mann-Whitney, $z = 0,78$ et $p = 0,43$).

Ainsi, les mesures subjectives de la charge mentale de travail et de la gêne sonore, initialement proposées pour comprendre la variabilité interindividuelle, n'expliquent pas la différence entre les deux groupes. Les analyses statistiques ne montrent pas de différences significatives ni pour la charge mentale de travail ($F(1,53) = 0,38$ $p = 0,5398$) ni pour la gêne sonore ($F(1,53) = 0,05$ $p = 0,8188$). Pour tous les participants, la charge générée par la tâche et la gêne due à la condition sonore sont perçues de façon similaire malgré les différences de performances des deux groupes.

Enfin, le dernier indicateur à notre disposition pouvant expliquer cette variabilité interindividuelle est la vigilance. Les scores de vigilance des deux groupes en fonction de l'ordre de passage du questionnaire sont donnés sur la figure 3.17. Pour le premier groupe (moins performant) le niveau de vigilance est constamment supérieur au niveau de vigilance du deuxième groupe (plus performant). Une ANOVA à mesure répétée à deux facteurs (moment de la journée et groupe) montre une différence significative entre les deux groupes ($F(1,53)=8,46$ $p = 0,0053$). On constate également grâce à un post-hoc de Tukey HSD (représenté par les barres horizontales sur la figure 3.17) une baisse significative de la vigilance au cours de l'expérience pour le premier groupe. Il existe une différence significative entre le moment 5 et le moment initial et 2. En revanche, la vigilance du second groupe, bien que plus faible, reste constante tout au long de l'expérimentation.

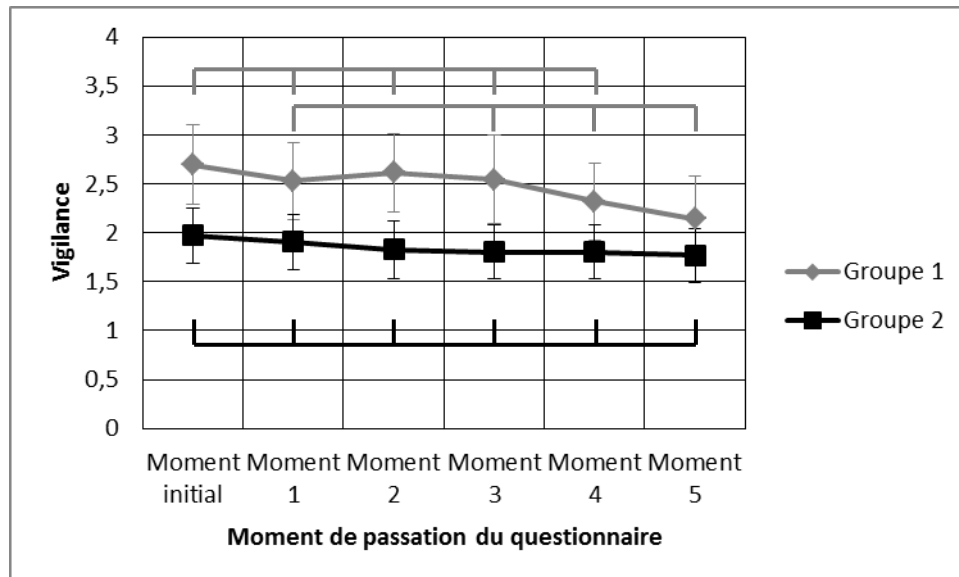


Figure 3.17. La note de vigilance en fonction de l'ordre du passage du questionnaire de Thayer pour les deux groupes formés à partir de la classification hiérarchique

Par conséquent, il existe bien une différence significative entre les deux groupes concernant le niveau de vigilance. Mais l'effet est contraire à ce qui pouvait être attendu puisque les participants les

plus vigilants sont les moins performants. Cependant, ce sont aussi ceux qui semblent le plus sensibles à la vigilance liée aux conditions sonores. Leur niveau de vigilance, bien que plus élevé, diminue au cours de l'expérience alors qu'elle reste stable pour les plus performants. D'après (Galy et coll., 2012), le niveau de vigilance détermine la quantité de ressources cognitives mobilisables par les individus, n'expliquant pas les performances des individus. Il semblerait que la diminution progressive du niveau de vigilance au cours de l'expérience chez les individus les moins performants soit le reflet de l'effet d'un facteur non considéré dans cette étude. Ce facteur pourrait être l'évaluation cognitive de la tâche. Le groupe le moins performant étant constitué de personnes plus âgées en moyenne, il se pourrait que ces personnes ressentent « une menace » plus importante vis-à-vis de la tâche que le groupe constitué de personnes plus jeunes. Ce résultat est en accord avec les résultats obtenus par Galy et Mélan (2015) qui montrent que, lors d'une tâche de calcul mental, les individus qui évaluent la tâche comme « menaçante », présente des performances plus faibles que les autres même lorsque leur niveau de vigilance est élevé. Ainsi, de nombreuses études montrent que l'évaluation d'une tâche de mémorisation comme « menaçante » augmente avec l'avancée en âge (Chasteen, Bhattacharyya, Horhota, Tam, & Hasher, 2005).

3.4. Conclusion

Le premier objectif de cette expérience était de tester la fiabilité du modèle de Hongisto pour deux plages différentes de valeurs de STI : lorsque le STI prend des valeurs entre 0,2 et 0,5 et lorsque le STI dépasse la valeur de 0,5.

Il s'agissait de :

- tester les valeurs d'un STI de 0,2 et de 0,5 qui, selon la norme ISO 3382-3 définissent respectivement la distance de confidentialité et celle de distraction,
- observer le comportement (plateau ou linéaire) du DP lorsque le STI prend des valeurs au-delà de 0,7.

Afin de répondre à cet objectif, quatre valeurs de STI ont été choisies : 0,25, 0,45, 0,75, 0,9. Les résultats de l'expérience confirment un effet du STI sur le DP. Cependant, les résultats du post-hoc de Tukey ne permettent pas de particulariser les valeurs 0,2 et 0,5, car les conditions de STI de 0,25, 0,45, et 0,9 ne sont pas significativement différentes. Par ailleurs, ces résultats ne permettent pas de valider l'hypothèse d'une possible augmentation linéaire du DP avec le STI pour des fortes valeurs d'intelligibilité (hypothèse inspirée de Schlittmeier et coll. (Schlittmeier et al., 2012)). Enfin, le fait qu'il n'y ait pas de différence entre la condition de 0,75 et 0,9 ne remet pas en cause le modèle proposé par Hongisto.

Le second objectif de cette expérience était d'avoir un meilleur contrôle sur les performances des participants en leur proposant divers tests psychologiques. Une des nouveautés de cette expérience est la mesure de l'empan mnésique et le paramétrage de la tâche de mémoire selon les capacités mnésiques des participants. Cela devait permettre d'avoir une évaluation plus précise de la performance pour chaque participant. Malgré cette adaptation de la tâche de mémoire aux capacités mnésiques, il existe toujours une grande variabilité interindividuelle. Enfin, les participants ont été séparés en deux groupes : le groupe des moins performants (groupe 1) se révèlent avec un âge moyen plus élevé que le groupe des participants plus performants (groupe 2). Aucune des mesures subjectives réalisées n'a permis de justifier cette différence entre les deux groupes. La seule hypothèse issue de la littérature concerne les capacités d'inhibition des participants selon leur âge. Les plus âgés auraient davantage de difficultés à ignorer le bruit que les plus jeunes. Pourtant, leur niveau de vigilance est bien plus élevé que le niveau des plus jeunes. Il se peut que les participants moins performants se sentent « menacé » par la tâche de sériation ce qui expliquerait leurs performances plus basses que celles du groupe des plus performants.

De façon plus générale, ce type d'expérience, de courte durée en laboratoire, est important pour la compréhension des processus cognitifs mis en œuvre lors d'un travail effectué en présence de bruit. Cependant, la méthodologie utilisée et l'explication de la variabilité interindividuelle lors de ce type de tâche sont différentes d'une étude à l'autre. Plusieurs paramètres de la tâche liés, notamment à sa difficulté (comme le nombre d'éléments à mémoriser, le fait de mémoriser des chiffres ou des mots, la durée du temps de rétention, etc.) diffèrent effectivement d'une étude à l'autre et ne permettent pas de converger vers des résultats généralisables. De plus, ce type d'expérience pourtant important pour l'étude des mécanismes cognitifs, ne semble pas écologiquement valide car ni la durée d'exposition, ni la tâche ne représentent la réalité complexe de l'activité de travail au sein des bureaux ouverts. Sur le terrain, les salariés des bureaux ouverts ne sont pas confrontés à des tâches de mémoire durant les 8 heures de leur journée de travail. Leur activité de travail est souvent complexe. Elle sollicite plusieurs processus cognitifs et elle est effectuée majoritairement en présence de bruits de parole. La prochaine question qui se pose alors est la suivante : existe-t-il un effet de ce bruit de parole quand la durée d'exposition est relativement longue ?

Pour répondre à cette question, une deuxième expérience est proposée lors de cette thèse. Cette expérience porte sur la gêne et la fatigue ressenties en présence du bruit de parole pour une durée d'exposition d'une journée de travail totale. Pour cette expérience, une tâche de bureautique a été envisagée afin d'occuper les participants durant la journée entière. Cela pourrait permettre d'apprécier

les effets du bruit de parole dans des conditions de laboratoire s'approchant de la réalité des activités mises en œuvre au sein de bureaux ouverts.

4. Expérience de longue durée en vue d'une simulation d'une journée de travail en bureau ouvert

4.1. Hypothèses

La deuxième expérience de cette thèse consiste à évaluer l'impact du bruit de parole sur la performance et la fatigue des participants lors d'une simulation en laboratoire d'une journée de travail en bureau ouvert. D'après une étude *in-situ* conduite par (Amato et al., 2017), les premiers effets psychologiques du bruit sur les occupants d'un bureau ouvert n'apparaissent qu'à la fin de la journée de travail. Dans la littérature, la seule expérience qui propose une durée d'exposition équivalente à la durée d'une journée de travail est celle conduite par (Lund et al., 2012). Cette expérience propose une méthodologie de mesures multitâches dans deux conditions sonores réalistes (enregistrement de bruits d'un bureau ouvert). Le même enregistrement était présenté dans les deux conditions sonores mais avec des niveaux sonores différents. Aucun effet significatif du niveau sonore sur la fatigue mentale n'a été montré lors de l'expérience. De même, le niveau sonore n'a pas eu d'influence sur les performances. Cela reste cohérent avec la majorité des expériences de courte durée qui comparent au moins les performances réalisées dans le silence et celles réalisées dans un bruit stationnaire.

L'expérience présentée dans ce chapitre propose une méthodologie exploratoire différente, pour étudier les effets de la parole intelligible lors d'expositions de longue durée. Tout d'abord, pour simuler des journées de travail, la durée d'exposition par condition sonore est d'environ 7 heures, comme pour (Lund et al., 2012). En revanche, le protocole de mesures proposé lors de cette expérience est différent. En se basant sur la méthodologie utilisée lors de la première expérience de la thèse, ce protocole permet la mesure de : la performance, la perception par les participants de l'environnement sonore, la fatigue ressentie lors de l'expérience et la charge mentale de travail générée par la tâche proposée.

Premièrement, pour évaluer l'effet de l'environnement sonore sur les performances, une tâche plus proche d'un travail de bureau, occupant les participants la majorité du temps lors des journées, est proposée au cours de cette simulation. De plus, une tâche de sériation est réalisée par les participants en début et en fin de journée afin d'avoir une mesure de comparaison avec les expérimentations menées en laboratoire.

Deuxièmement, plusieurs questionnaires, détaillés dans la partie suivante, sont utilisés pour évaluer, plusieurs fois au cours de la journée, la fatigue ressentie, l'évaluation subjective de l'environnement sonore et la charge mentale de travail.

Finalement, l'hypothèse principale de cette expérience consiste à observer un effet des conditions sonores de l'environnement sur l'ensemble des mesures objectives (performances de mémorisation et performances lors de la tâche principale) et subjectives (mesures au travers des questionnaires). Pour cette expérience exploratoire, trois conditions sonores ont été utilisées :

- Un bruit stationnaire;
- Une parole parfaitement intelligible;
- Un bruit modulé en amplitude.

4.2. Description expérimentale

4.2.1. Banc expérimental

L'expérience s'est déroulée dans la chambre semi-anéchoïque de l'INRS (Institut National de Recherche et de Sécurité). Six postes de travail en forme de marguerite ont été installés au milieu de la salle, comme présenté sur les photos de la figure 4.1. Pour l'expérience, chaque participant est venu trois jours et avait la possibilité de changer de poste de travail d'un jour à l'autre. Chaque jour correspondait à une condition sonore différente. La même procédure a été suivie pour chaque journée d'expérimentation (voir la description détaillée en partie 2.7 de ce manuscrit).

Chaque poste était équipé d'un ordinateur (écran, clavier, souris), d'un crayon et de feuilles de brouillon. Les participants étaient assis en face d'un écran comme dans une situation de travail en bureau. Les questionnaires étaient informatisés et la réalisation de la tâche nécessitait un logiciel de traitement de texte et de calcul. Le poste de l'expérimentateur permettant de piloter les ordinateurs des participants se trouvait à côté de l'entrée de la salle (partie encadrée sur la figure 4.1).



**Figure 4.1. Banc expérimental (à gauche, vue sur la marguerite depuis l'entrée de la salle semi-
anéchoïque. A droite, vue sur l'entrée et le poste de l'expérimentateur : partie entourée sur la droite
de la photo)**

Une source omnidirectionnelle de type 4292-L (Brüel & Kjær), visible sur la photo de gauche de la figure 4.1, a été installée à 5,70 m de hauteur par rapport au sol, à l'aplomb de la marguerite afin d'obtenir un champ acoustique uniforme aux six positions des participants. Le signal sonore émis depuis la source était systématiquement égalisé pour avoir, aux positions des sujets, un spectre de type bruit de parole, conforme aux recommandations de la norme ISO 3382-3, 2012 pour une source omnidirectionnelle. Ce spectre est dit LTASS pour Long-Term Average Speech Spectrum. Ses valeurs par bande d'octave (de 125 Hz à 8 kHz) sont données sur la figure 4.2. Sur les bandes basses et moyennes fréquences (≥ 1 kHz), les écarts entre les différentes positions sur la marguerite et la norme sont de l'ordre de 1 dB. A 2 kHz, il est de l'ordre de 4 dB et peut atteindre 7 dB pour les hautes fréquences. Il faut souligner qu'il est difficile de contrôler un champ acoustique pour des fréquences au-delà de 2 kHz. Du point de vue global, l'écart maximal est de 0,9 dB(A) entre le poste numéro 1 et le poste numéro 5 (tableau 4.1)

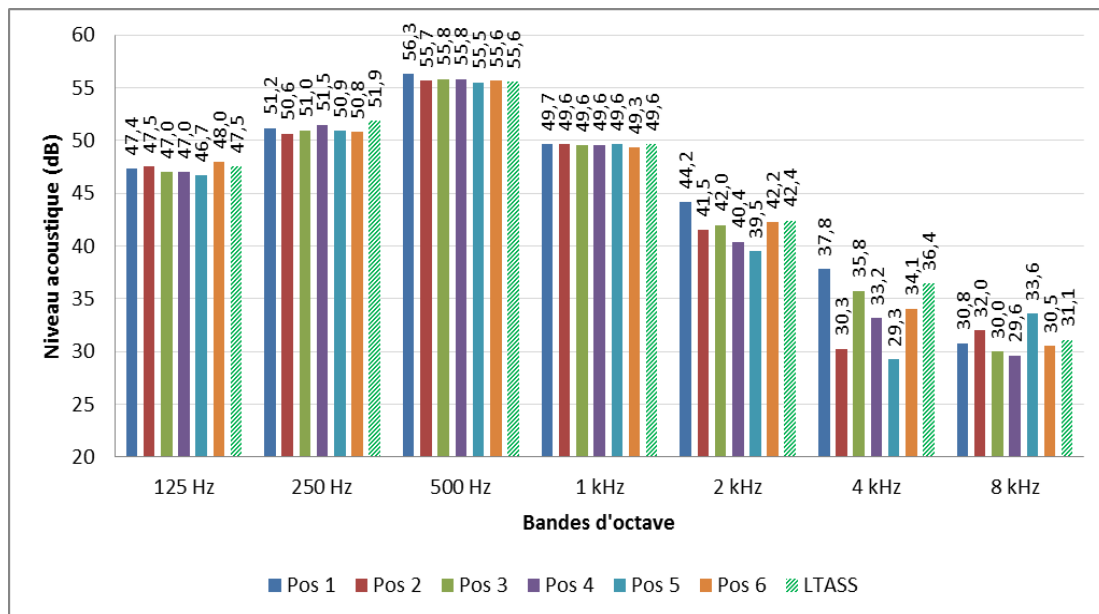


Figure 4.2. Spectres en bande d'octave mesurés aux six postes de la marguerite et spectre normalisé (ISO 3382-3, 2012) avec un niveau acoustique global de 55 dB(A)

4.2.2. Participants

Trente-neuf participants, 23 femmes et 16 hommes, ont réalisé cette expérience. L'âge médian était de 27 ans, le minimum de 20 ans, le maximum de 62 ans et l'âge moyen de 28 ans avec un écart-type de 9,6 ans. Toutes les personnes ont été informées brièvement de la nature de cette expérience en termes de bénéfices attendus, de déroulement de l'étude, de contraintes et de risques éventuels (annexe A). La participation était volontaire contre une indemnisation de 300€ et une possibilité d'arrêt à tout moment. Préalablement à l'expérimentation, tous les participants ont passé un test d'audiométrie tonale pour évaluer leurs pertes auditives éventuelles. Selon les recommandations de BIAP (Bureau International d'Audiophonologie), les pertes auditives d'une oreille se calculent comme la moyenne des pertes pour les octaves de 500 Hz à 4000 Hz (consulter la page web <https://www.biap.org/fr/>). Selon ce critère, une personne a une audition normale lorsque la perte tonale moyenne des quatre bandes d'octave est inférieure à 20 dB. En suivant ce critère, un seul participant avait une perte de 20,5 dB à l'oreille droite. En considérant la meilleure oreille de chaque participant, aucun ne présentait de pertes.

4.2.3. Stimuli sonores

Tous les signaux ont été présentés aux participants à un niveau acoustique d'environ 55 dB(A) (tableau 4.1). Cette valeur est représentative du niveau sonore typiquement mesuré en bureau ouvert par l'INRS dans les bureaux ouverts depuis 2012 (P Chevret, 2015a, 2015b; Perrin Jegen & Chevret, 2016; Pierrette et al., 2015).

Numéro du poste	1	2	3	4	5	6
Niveau global du LTASS mesuré (dB(A))	55,7	55,1	55,2	55,1	54,8	55
Niveau global du spectre de ventilation (dB(A))	39,9	39,7	39,4	39,7	39,9	39,8

Tableau 4.1. Niveaux globaux mesurés aux six postes de la marguerite pour le spectre LTASS et pour celui du bruit de la ventilation

Chaque signal sonore est composé d'un signal cible avec un spectre LTASS et d'un bruit de ventilation dont le spectre mesuré aux six postes de la marguerite est présenté sur la figure 4.3. Le signal de ventilation est envoyé aux six postes de la marguerite à un niveau acoustique de 40 dB(A). L'écart maximal entre les postes est de 0,5 dB(A) pour le niveau global (tableau 4.1). Pour les mêmes raisons que dans la partie 2.1, nous n'avons pas cherché à compenser les défauts observés dans les bandes d'octave de 2, 4 et 8 kHz.

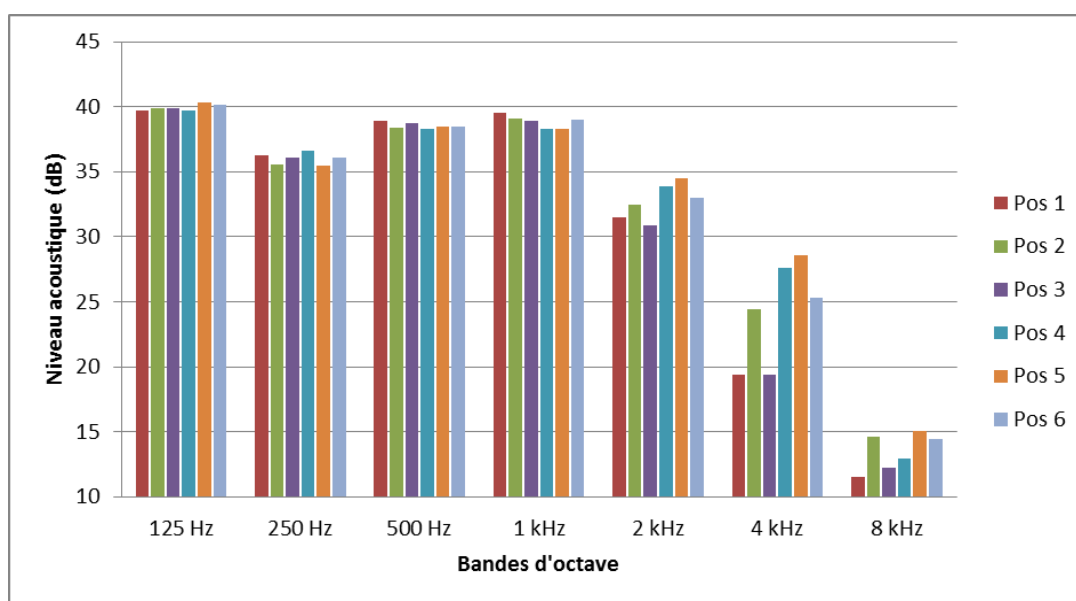


Figure 4.3. Spectres en bandes d'octave du bruit de ventilation mesurés aux six positions du banc expérimental (niveau global de 40 dB(A))

La première condition sonore est un bruit stationnaire constitué de la somme d'un bruit blanc égalisé LTASS et du bruit de ventilation dont le niveau global est 15 dB(A) en dessous du bruit blanc stationnaire. La sommation est faite directement sur les signaux échantillonnés à la même cadence de

44100 Hz. Le signal est ensuite envoyé dans la chambre semi-anéchoïque au travers de la source omnidirectionnelle pour obtenir aux postes un niveau sonore égal à 55 dB (A). La figure 4.4 montre les spectres moyens mesurés pendant 6 h 45 min aux six positions de la marguerite. Comme attendu, le spectre mesuré est très proche de celui de la figure 4.2 puisque le rapport signal sur bruit est relativement important.

Pour cette condition sonore, la valeur de la modulation équivalente MeqA125ms ($\text{LA}_{\text{eq}} - L_{125\text{ms}}^{90}$) calculée pour le signal mesuré aux postes est de 0,5 dB(A), confirmant le caractère stationnaire du bruit envoyé aux six positions.

La deuxième condition est celle de la parole intelligible. Quinze livres audio de douze narrateurs (sept hommes et cinq femmes) ont été sélectionnés pour créer un signal de six heures et quarante-cinq minutes. Ces livres audio ont été pris dans une base de données gratuite sur internet (consulter la page web <http://www.litteratureaudio.com/>). Des parties d'environ dix minutes ont été extraites des livres audio et recollées dans le même signal de façon qu'un/e narrateur/narratrice apparaisse une fois toutes les deux heures environ. Le signal de parole a été nettoyé d'éventuels bruits parasites ou de défauts d'enregistrement. Les longues pauses qui apparaissent en cours de lecture ont aussi été supprimées. Le signal correspondant à chaque narrateur a été égalisé selon le LTASS et normalisé de façon à avoir le même niveau pour chaque narrateur. Finalement, une sommation de ce signal de parole avec le bruit de ventilation est faite avec un rapport signal sur bruit de 15 dB. Cette procédure est donnée schématiquement sur la figure 4.5.

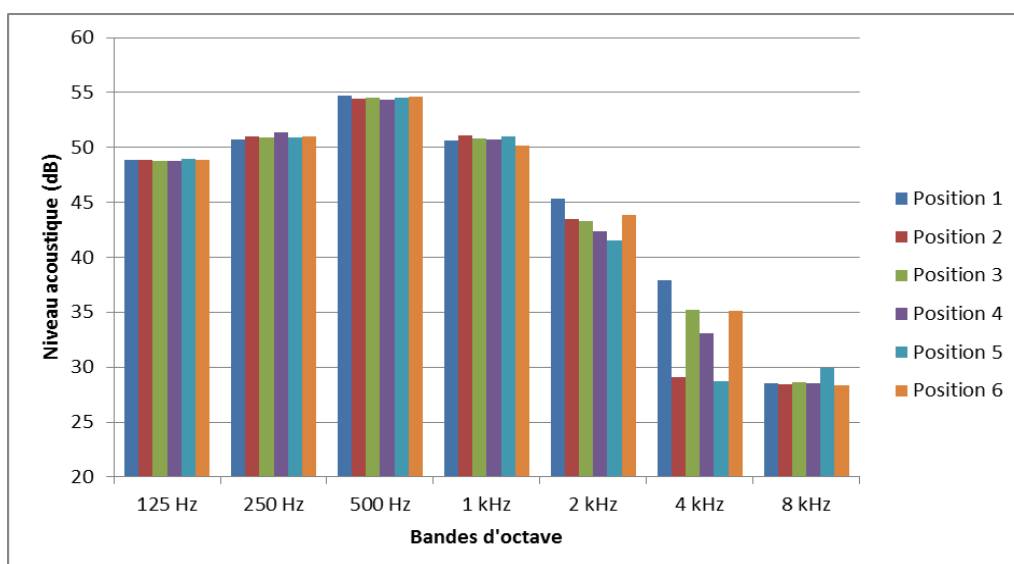


Figure 4.4. Spectres en bandes d'octave du bruit stationnaire mesurés aux six positions de la marguerite pour un niveau acoustique moyen de 55 dB(A)

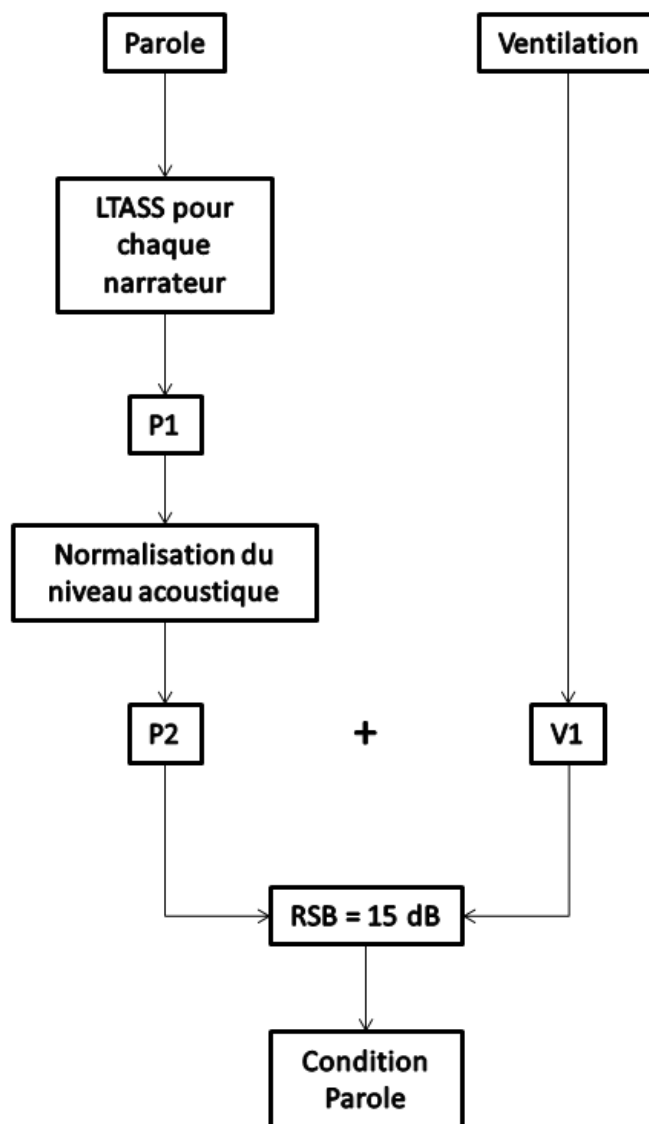


Figure 4.5. Création du signal audio de la condition de parole intelligible.

La troisième condition est celle d'un bruit blanc modulé par l'enveloppe d'un signal de parole. L'idée est ici de faire abstraction des particularités fréquentielles (fréquence fondamentale et harmoniques par exemple) et du sens qui caractérise une conversation pour ne se focaliser que sur les modulations. Pour cela, comme dans la première condition, le signal de départ est un bruit blanc égalisé LTASS (représenté par « B1 » dans le schéma de la figure 4.6). Ce signal est ensuite modulé par l'enveloppe du signal de parole de 8 heures (le signal P2 sur la figure 4.5) de la condition précédente (représenté par « ENV » dans le schéma de la figure 4.6). Initialement deux méthodes ont été testées pour fabriquer l'enveloppe.

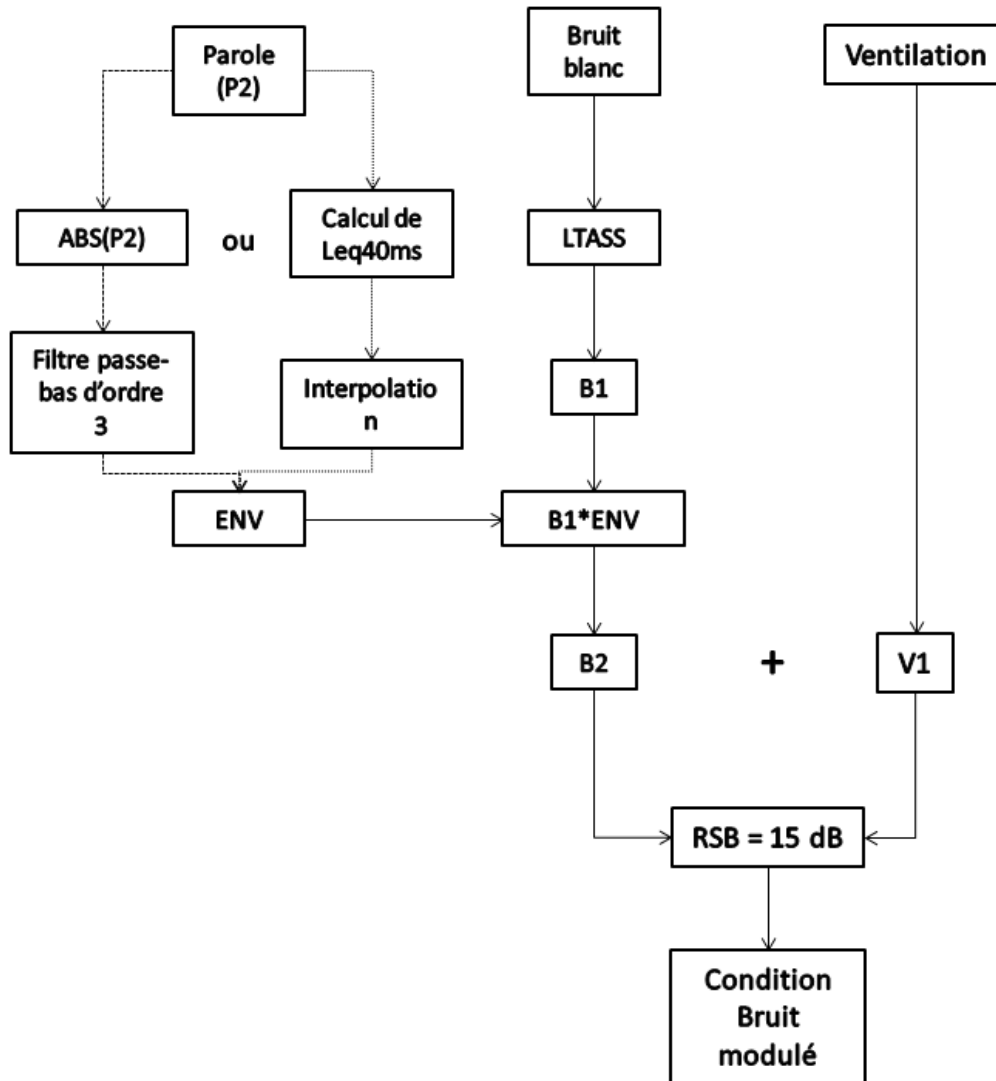


Figure 4.6. Création de la troisième condition sonore en utilisant soit, la méthode classique de calcul de l'enveloppe soit, la méthode du Leq_{40ms}

La première méthode consiste à calculer l'enveloppe du signal de parole (le signal « P2 » de la figure 4.5) en filtrant la valeur absolue du signal de parole avec un filtre passe-bas de Butterworth d'ordre 3. La fréquence de coupure du filtre est de 28 Hz. Cela permet de garder dans l'enveloppe les principales modulations d'amplitude de la parole.

La deuxième méthode consiste à calculer l'enveloppe en utilisant le Leq court échantillonné à 40 ms. Cet échantillonnage revient à calculer un niveau moyen dans le signal de parole à une fréquence de 25 Hz. Cette enveloppe est ensuite ré-échantillonnée à la fréquence de 44100 Hz.

Une fois l'enveloppe ENV estimée à la fréquence d'échantillonnage de 44100 Hz, elle est multipliée « point-par-point » avec le bruit blanc égalisé LTASS pour obtenir un bruit égalisé LTASS modulé comme le signal de parole (représenté par « B2 » dans le schéma de la figure 4.6). En sommant le signal B2 et le bruit de ventilation avec un RSB = 15 dB, on obtient le signal audio de la dernière condition.

Afin de vérifier la robustesse des méthodes de calcul de l'enveloppe vis-à-vis du MeqA125ms, une comparaison a été réalisée entre le signal de parole et les signaux synthétiques basés sur le calcul d'enveloppe. Pour cela, le MeqA125ms est calculé sur le signal audio numérique toutes les minutes sur la totalité du signal numérique (six heures et quarante-cinq minutes). Une différence pour chaque minute entre le MeqA125ms de la condition de parole et le MeqA125ms de la condition du bruit modulé avec chacune des méthodes, est calculée. Sur la figure 4.7, sont présentées les distributions de cette différence pour la méthode de l'enveloppe classique (noir) et pour la méthode de l'enveloppe L_{eq40ms} (rouge).

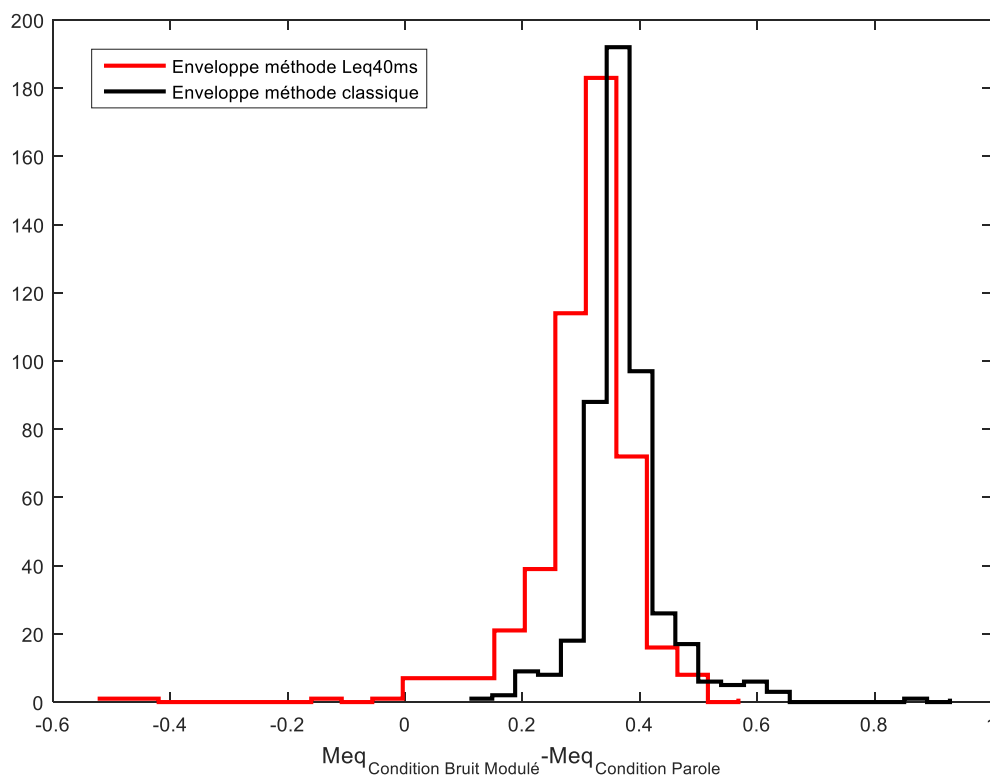


Figure 4.7. Distributions de la différence point par point entre le MeqA125ms du bruit modulé et le MeqA125ms de la condition de parole, pour la méthode de l'enveloppe obtenue par filtrage passe-bas (noir) et pour la méthode du Leq court.

Les différences obtenues pour les deux méthodes sont inférieures à 1 dB. Un rapide test de perception de la qualité des signaux synthétisés a également été réalisé. Pour cela, deux échantillons d'une minute ont été présentés à 5 personnes en leur demandant lequel ils préféreraient et lequel leur paraissait le moins artificiel. Les cinq personnes ont choisi l'enveloppe réalisée à partir du $LA_{eq,40ms}$, en précisant que le signal était moins « saccadé ». C'est donc la méthode du Leq court qui a été retenue.

Un calcul de STI est également fait à partir des spectres mesurés de la parole seule à 55 dB(A) et de la ventilation à 40 dB(A), pour les six positions. L'effet de la salle n'est pas pris en compte puisque l'expérience a lieu dans une chambre semi-anéchoïque. Lorsque le RSB est égal à 15 dB(A), le STI doit être égale à 1. Dans notre cas le STI mesuré est 0,9 car dans la mesure est faite autour de la marguerite, aux positions des participants. A la présence des objets dans la salle des réflexions mineures apparaissent qui remplissent le signal et qui font baisser la valeur de STI. Malgré ces réflexions mineures, un signal de parole avec un STI de 0,9 correspond à un signal de parole totalement intelligible.

4.2.4. Questionnaires

Tout au long de la journée, les participants devaient compléter plusieurs questionnaires qui permettaient d'évaluer la gêne sonore, de la fatigue, de la vigilance, etc. Certains questionnaires n'ont été passés qu'une seule fois et d'autres ont été répétés plusieurs fois au cours de la journée (figure 4.8). L'ensemble de ces questionnaires a été implémenté dans le logiciel Sphinx iQ2 (logiciel de mise en place des questionnaires d'une enquête) de façon à ce que la saisie soit la plus simple possible pour les participants. Au début de chaque questionnaire sont rappelées les consignes pour le remplir. Les questionnaires utilisés sont :

- 1) Le questionnaire MFI 20 (Multidimensional Fatigue Inventory), de Smets et al. (E. Smets, B. Garssen, B. d. Bonke, & J. De Haes, 1995; Smets, Garssen, Cull, & de Haes, 1996), qui évalue plusieurs dimensions de la fatigue perçue, à travers vingt questions. La réponse à chaque question est donnée sur une échelle de Likert en cinq points. Deux dimensions sont prises en considération pour cette expérience :
 - a) la fatigue générale : la perception du fonctionnement physiologique général d'une personne (ex. : « Je me sens reposé(e) »)
 - b) la fatigue mentale : la fatigue qu'une personne ressent après un effort mental lors de l'exécution une tâche (ex. : « Il me faut beaucoup d'efforts pour me concentrer »)
- 2) Le questionnaire pour l'évaluation de l'environnement sonore. Il comprend trois questions permettant aux participants, au moyen d'une échelle visuelle analogique (EVA), d'évaluer leur

perception de l'environnement sonore entre : calme – bruyant, pas du tout gênant – extrêmement gênant et pas du tout fatigant – extrêmement fatigant.

- 3) Le questionnaire ICA, ajusté au contexte expérimental de cette étude, qui a vocation à évaluer la charge mentale de travail générée par l'activité (Galy, 2017; Galy et al., 2012; Galy & Gaudin, 2014). Il mesure quatre dimensions à travers trente-et-une questions données sur une échelle de Likert en huit points :
 - a) la charge intrinsèque
 - b) la charge externe
 - c) les ressources disponibles
 - d) la charge essentielle.
- 4) Le questionnaire de Thayer (Thayer, 1978; Robert E Thayer, 1986) permet d'évaluer les niveaux de vigilance et de tension perçues par le participant au moment de l'expérience, ceci grâce à vingt adjectifs. Le sujet doit définir son état par rapport à chacun des adjectifs, en cliquant sur l'une des quatre modalités de réponse allant de « Je me sens très... » à « Je ne me sens pas du tout... ».
- 5) Le questionnaire KSS (Karolinska Sleepiness Scale) évalue la somnolence perçue au travers d'une question « Quel est votre degré de somnolence en ce moment ? ». Les participants répondent sur une échelle de Likert en neuf points. Ce questionnaire a été développé et validé par Åkerstedt et Gillberg (Torbjörn Åkerstedt & Gillberg, 1990).
- 6) Le questionnaire GABO (Gêne Acoustique dans les Bureaux Ouverts) est issu de la norme française NF S 31-199 (2016) (AFNOR, 2016; Le Muet & Chevret, 2016) sur les bureaux ouverts (Chatillon & Chevret, 2014; Le Muet & Chevret, 2014, 2016; Perrin Jegen & Chevret, 2016; Pierrette et al., 2015). Ce questionnaire évalue plusieurs aspects de l'activité d'un bureau ouvert (l'environnement de travail, la perception du bruit sur le plateau, la sensibilité au bruit, la perception de la santé). Pour cette expérience, c'est une version réduite et adaptée qui a été utilisée. Cette version contient 14 questions (échelle de Likert en 5 points) portant sur l'environnement de travail en termes de satisfaction globale, confort et privacité.
- 7) Le questionnaire de typologie circadienne de Horne et Ostberg (Horne & Ostberg, 1976) qui permet de mettre en évidence si une personne se sent plutôt matinale ou plutôt vespérale.

4.2.5. Tâche de sériation

Pendant l'expérience, les participants ont réalisé une tâche de sériation deux fois par condition sonore : le matin (au début de la session expérimentale) et en fin d'après-midi juste avant de terminer la session expérimentale. La tâche était entièrement informatisée.

Chaque participant était installé devant l'ordinateur d'un des six postes de travail. Avant la tâche, l'expérimentateur lisait les consignes puis invitait les sujets à démarrer la tâche à l'aide du logiciel dédié. La tâche se déroulait comme suit : une permutation aléatoire de neuf chiffres entiers compris entre 1 et 9 était présentée au participant. Chaque chiffre apparaissait au centre de l'écran pendant 1 seconde et était séparé du suivant par un temps mort de 0,25 secondes. Les chiffres étaient affichés en gris foncé sur un fond gris clair. La taille de chacun des chiffres était de 8 centimètres de haut afin qu'ils soient aisément lisibles. Après la disparition du dernier chiffre, il était demandé aux participants de restituer immédiatement la série présentée sur un pavé numérique. Ce pavé apparaissait au centre de l'écran. Il contenait neuf boutons, chacun correspondant à un chiffre. Le participant devait restituer les chiffres en cliquant sur les boutons dans l'ordre qui, selon lui, correspondait à l'ordre d'apparition de la suite de chiffres. La phase de restitution durait 15 secondes. La série suivante était présentée automatiquement au participant. Au total, il devait restituer vingt-cinq séries de neuf chiffres.

Afin de familiariser les sujets avec cette tâche, trois séries de neuf chiffres leur étaient proposées en guise d'entraînement avant la tâche proprement dite.

4.2.6. Tâche de « revue de presse »

Tout au long de la journée, une tâche de revue de presse était demandée aux participants. Cette tâche présente l'avantage de pouvoir être d'une longue durée de réalisation et de mettre les participants dans des conditions plus réalistes que les expériences habituelles de laboratoire basées sur des tâches de sériation de courte durée mentionnées dans la partie 2.2. La tâche de revue de presse permettait également de mettre en jeu plusieurs processus cognitifs comme : la génération d'idées, la sollicitation de la mémoire à long terme, l'organisation et la transformation de ces idées en représentation orthographique (Flower & Hayes, 1981; van de Poll, Ljung, Odelius, & Sörqvist, 2014).

Avant de débiter, les participants étaient mis en situation par l'expérimentateur qui les informait qu'ils devaient réaliser cette tâche pour leur supérieure(e) qui devait avoir prochainement une réunion très importante et qui devait impérativement avoir une connaissance exhaustive de l'actualité. Pour cela, tous les participants disposaient de quatre journaux d'informations différents. Les journaux changeaient d'une condition sonore à l'autre. À partir de ces journaux, chaque participant devait mener deux activités distinctes, à sa guise, durant toute la journée. Il n'était pas nécessaire de terminer une activité avant d'entamer l'autre. Le participant était donc libre de s'organiser comme il le souhaitait.

La première activité consistait à identifier l'ensemble des thèmes abordés dans les quatre journaux. À la fin de la journée, le participant devait avoir renseigné dans un document Excel l'ensemble des thèmes qu'il avait identifiés.

La deuxième activité était une synthèse d'un maximum de thèmes identifiés lors de la première activité. Pour faire la synthèse d'un thème, le participant devait croiser les informations des journaux dans lesquels le thème était abordé. La synthèse devait être rédigée dans un document Word, contenir au minimum 250 mots et ne pas dépasser une page.

Le participant pouvait s'organiser comme il le souhaitait, mais à la fin de « la journée de travail » les documents Word et Excel devaient être aussi exhaustifs que possible.

4.2.7. Protocole de l'expérience

Tous les participants ont consacré à l'expérience trois journées de 8 heures, de 9h00 à 17h00. A chaque jour correspondait une condition sonore. Tous les participants ont été exposés pendant 6 heures et 45 minutes aux bruits ambiants définis précédemment. Pour éviter un éventuel effet d'ordre, 13 participants ont commencé l'expérience par la condition sonore 1 (bruit stationnaire), 13 autres ont commencé par la condition 2 (bruit blanc modulé) et enfin les 13 derniers par la condition 3 (bruit de parole). L'organisation du passage des participants pour les deux conditions sonores suivantes était difficile. De ce fait les deux conditions ont été passées selon un agenda qui dépendait des disponibilités des participants – donc pas de possibilité d'équilibrer les ordres. Le tableau 4.2 montre le nombre de participants par ordre possible.

Ordre	Bruit st.- Bruit modulé- Parole	Bruit st.- Parole- Bruit modulé	Parole-Bruit st.-Bruit modulé	Parole-Bruit modulé- Bruit st.	Bruit modulé- Bruit st.- Parole	Bruit modulé- Parole-Bruit st.
Nombre de participant	12	1	11	2	5	8

Tableau 4.2. Répartition des participants selon l'ordre de passage des conditions sonores

A chaque session, plusieurs participants étaient présents dans la salle en même temps. Leur nombre était différent selon les disponibilités. Au final, on a pu dénombrer huit jours avec six participants, cinq jours avec cinq participants, quatre jours avec quatre participants, six jours avec trois participants, quatre jours avec deux participants et deux jours avec un seul participant. Finalement, l'expérience a duré 29 jours répartis sur deux mois.

Un expérimentateur accompagnait les participants tous les jours. La journée se déroulait comme suit (figure 4.8) : à partir de 8h30 et jusqu'à 8h50, l'expérimentateur accueillait les participants. A 8h50, les participants étaient installés à leur poste de travail à l'intérieur de la salle d'expérience. Dans le silence, les participants remplissaient la première série de questionnaires comprenant le questionnaire de l'évaluation subjective de l'environnement sonore (« calme-bruyant », gêne sonore, fatigue sonore), le questionnaire de Thayer, le questionnaire KSS et le questionnaire MFI 20. Pour chaque session de questionnaires, l'expérimentateur vérifiait que tous les participants avaient bien rempli tous les questionnaires demandés. Entre 9h00 et 9h15, les participants réalisaient la tâche de sériation. Ils commençaient par la phase d'habituation, dans le silence, avant de passer le test complet de sériation, dans le bruit. Ensuite, les participants sortaient de la salle avec l'expérimentateur. Quelques consignes étaient données par l'expérimentateur pour le déroulement de la journée et pour la tâche de « revue de presse ». Puis, les participants s'installaient à leur poste de travail afin de réaliser la revue de presse. Des pauses étaient prévues à différents moments de la journée (voir ci-dessous). Les participants n'avaient pas le droit de communiquer oralement avec les autres personnes dans la salle. L'utilisation du téléphone portable était possible, mais seulement en mode silence et sans vibreur. Les appels n'étaient autorisés que pendant les pauses. En cas de questions, les participants pouvaient communiquer par email avec l'expérimentateur grâce à un outil de messagerie qui était installé sur tous les ordinateurs de l'expérience. En dernier recours, les participants pouvaient également lever la main pour appeler l'expérimentateur.

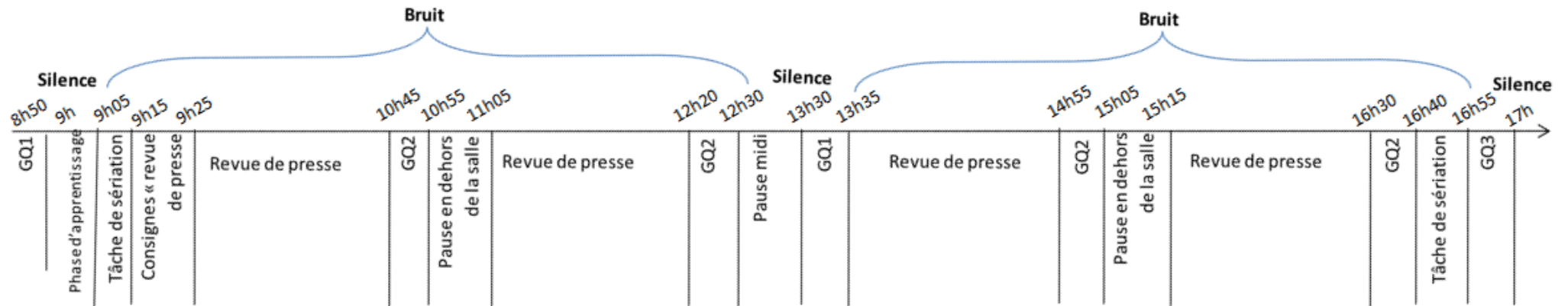
Tous les ordinateurs étaient reliés à internet. Les participants étaient informés que l'ensemble des activités sur les ordinateurs était enregistré dans un fichier vidéo à l'aide d'un logiciel de capture d'écran vidéo (Camtasia Studio).

Entre 9h25 et 10h45, les participants exécutaient la tâche de « revue de presse ». Ensuite, une deuxième session de questionnaires était proposée aux participants, de 10h45 à 10h55. Le début des sessions « questionnaires » était annoncé par un lancement automatique du logiciel utilisé pour le remplissage des questionnaires. Ce lancement se faisait en même temps sur les bureaux de tous les ordinateurs de l'expérience. Il était accompagné par l'apparition automatique d'une fenêtre au premier plan du bureau, contenant un message de rappel pour remplir les questionnaires. Lors de la session, les participants remplissaient le questionnaire sur la charge de travail perçue, en plus des questionnaires mentionnés pendant la première session. Entre 10h55 et 11h05, une pause à l'extérieur de la salle était prévue. Lors de cette pause, les participants pouvaient consommer du café, des petits gâteaux, utiliser les toilettes et fumer, s'ils le souhaitaient. La sortie de la salle d'expérience était obligatoire pendant les pauses afin que les participants ne fussent pas exposés au bruit. Après la pause, les participants retournaient à leur poste pour continuer leur travail de « revue de presse », de 11h05 à 12h20. Les dix dernières minutes de

la matinée servaient pour la troisième session de questionnaires. Les participants répondaient aux mêmes questionnaires que pendant la deuxième session (Bond et Lader, l'évaluation de l'environnement sonore, le questionnaire de Thayer, le questionnaire KSS, celui de MFI 20 et le questionnaire de la charge de travail perçue). À 12h30, tous les participants étaient invités à déjeuner au restaurant d'entreprise de l'INRS. Cette pause déjeuner durait jusqu'à 13h30.

À 13h30 les participants s'installaient à nouveau dans la salle et dans le silence, ils remplissaient pour une quatrième fois l'évaluation de l'environnement sonore, le questionnaire de Thayer, le KSS et le questionnaire MFI 20. À 13h35, le système de génération du bruit était à nouveau allumé dans la salle et les participants reprenaient leur activité de « revue de presse » jusqu'à 14h55. Une cinquième session de questionnaires était alors proposée aux participants pendant dix minutes : les mêmes questionnaires que dans la deuxième et la troisième session (lors de la matinée). Entre 15h05 et 15h15, les participants faisaient à nouveau une pause de 10 minutes. Ensuite, ils reprenaient leur travail de « revue de presse » jusqu'à 16h30. Une sixième session de questionnaires était réalisée à 16h30, comprenant les mêmes questionnaires que la session précédente. À 16h40 et jusqu'à 16h55, les participants effectuaient une seconde fois la tâche de sériation, dans le bruit, sans phase d'habituation. Les consignes étaient rappelées oralement par l'expérimentateur. Finalement, de 16h55 à 17h05 les participants remplissaient le questionnaire GABO modifié. Les participants n'ont répondu au questionnaire Horne et Ostberg qu'une seule fois (à la fin de leur premier jour d'expérience).

Figure 4.8. Schéma du protocole de la journée type



Groupe 1 des questionnaires (GQ1) :

- Questionnaire de Thayer
- KSS
- MFI 20
- Evaluation subjective de l'environnement sonore

Groupe 2 des questionnaires (GQ2) :

- Questionnaire de Thayer
- KSS
- MFI 20
- Evaluation subjective de l'environnement sonore
- Charge mentale de travail

Groupe 3 des questionnaires (GQ3) :

- GABO modifié
- Horne et Ostberg

4.3. Résultats

Les analyses statistiques ont été menées à l'aide du logiciel STATA14. Lors de l'expérience, les participants ont été amenés à remplir les questionnaires et à réaliser les tâches plusieurs fois au cours de la journée et pour chaque condition sonore (sauf la version réduite du questionnaire GABO qui n'a été remplie qu'une fois par condition sonore donc par journée). Cela signifie que les variables d'intérêt (réponses aux questionnaires, performances lors de la tâche de mémoire et lors de la tâche de revue de presse) sont mesurées plusieurs fois sur le même participant. Des analyses statistiques différentes ont été réalisées sur les résultats selon qu'il s'agit des états psychologiques des participants (fatigue, tension, vigilance, somnolence), de l'évaluation subjective de l'environnement sonore (« calme – bruyant », gêne sonore, fatigue sonore), des performances réalisées lors de la tâche de sériation, de la charge mentale de travail ou des performances à la revue de presse. Une analyse de variance à mesures répétées est faite pour chaque variable d'intérêt. Les performances lors de la tâche de revue de presse sont mesurées par le nombre de mots écrits.

Une analyse de variance à mesures répétées (RM-ANOVA) à un facteur est ainsi réalisée pour analyser l'effet des conditions sonores sur le GABO et sur les performances à la tâche de revue de presse. Ensuite, une RM-ANOVA à deux facteurs est effectuée pour étudier l'effet des conditions sonores et du moment de la journée sur toutes les autres variables.

4.3.1. Mesures objectives

4.3.1.1. Performances réalisées à la tâche de sériation

Rappelons que pour chaque condition sonore, les participants devaient réaliser la tâche de sériation deux fois, une fois en début de journée et une autre fois en fin de journée. La performance dans l'exécution de la tâche est calculée comme le rapport entre le nombre de chiffres correctement restitués (à la bonne place) et le nombre total de chiffres à mémoriser.

Comme pour les expériences de courte durée (Ebissou, 2013), nous avons calculé le décrement de performance (DP) à partir des réponses des auditeurs dans la condition de bruit modulé ou de parole et dans la condition du bruit stationnaire, pour le soir et le matin respectivement. Sur la figure 4.9, sont données les valeurs moyennes DP accompagnées de leurs intervalles de confiance à 95 %, en fonction des conditions sonores, pour la tâche du matin (bleu) et la tâche de fin de journée (rouge).

Pour la condition de parole, les valeurs de DP sont du même ordre de grandeur que ceux habituellement relevés pour une parole complètement intelligible.

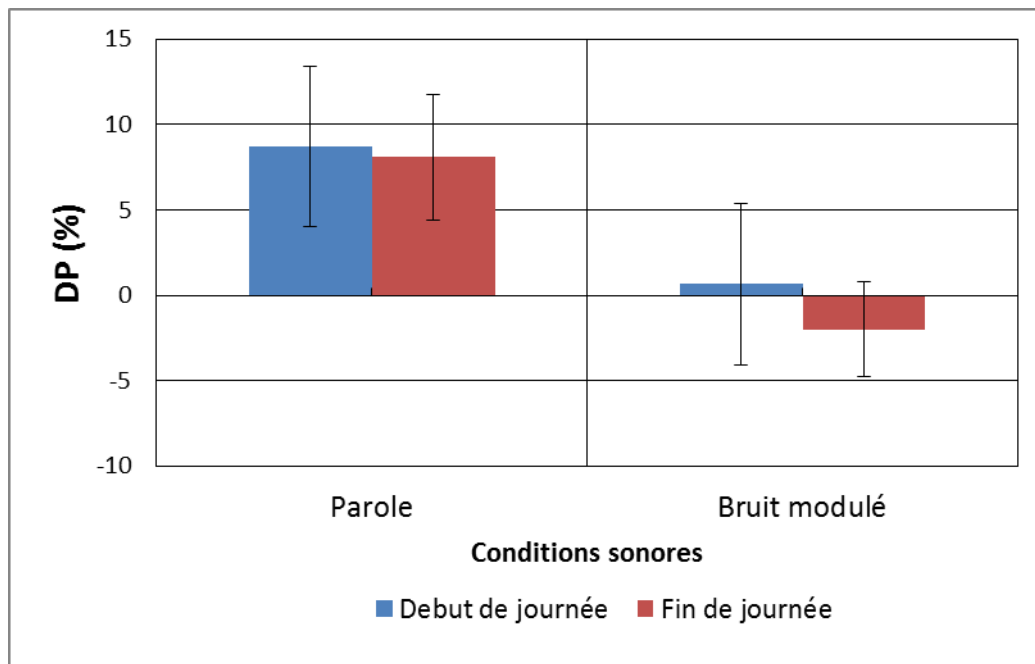


Figure 4.9. Le DP pour la parole et le bruit modulé en début (bleu) et fin (rouge) de journée.

La figure montre que la valeur moyenne du DP du bruit modulé est proche de 0, contrairement à la valeur moyenne du DP de la parole. Les résultats de l'ANOVA sur le DP montrent une différence significative entre les deux conditions sonores testées ($F(1,36) = 33,15$ $p < 0,0001$). Ce résultat rejoint certaines études en laboratoire (Salamé & Baddeley, 1989) (exp. 3) et (Jones et al., 1992) (exp. 2b). Selon ces études, il semblerait que pour avoir des performances significativement différentes par rapport à une condition de bruit stationnaire, un bruit seulement modulé en amplitude ne suffit pas.

En ce qui concerne la différence entre la mesure du matin et la mesure du soir, il n'y a pas d'effet significatif du moment de la journée sur le DP. Cela s'explique par le fait que la différence est faite entre les mesures réalisées au même moment de la journée. En effet, la figure 4.10 montre une variation de la performance lors de la journée, pour chacune des conditions de bruit.

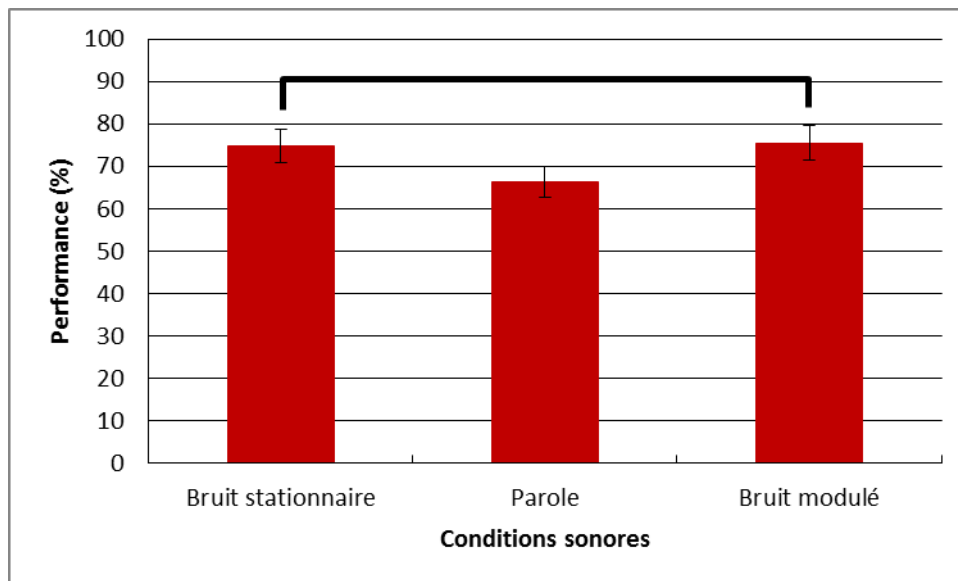


Figure 4.10. Performance lors de la tâche de sériation en fonction des trois conditions sonores. En bleu est représentée la performance pour la tâche du matin et en rouge celle pour la tâche du soir.

Les performances obtenues en fin de journée sont meilleures que celles de début de journée. Une RM-ANOVA à deux facteurs, en fonction des conditions sonores et du moment de la journée, indique un effet significatif des deux variables sur la performance à réaliser la tâche de sériation. L'effet des conditions sonores ($F(2,72) = 18,77$ $p < 0,0001$) provient d'une seule différence significative entre la condition de parole et les deux autres conditions. Les résultats du post-hoc de Tukey HSD sont donnés par les barres horizontales. Les conditions reliées par ces barres ne sont pas significativement différentes.

Les performances en présence du bruit de parole sont plus basses que les performances dans les deux autres conditions. Ce résultat confirme les commentaires donnés ci-dessus sur le DP. En revanche, pour la mesure de performance brute, lorsque les participants réalisent la tâche en fin de journée la performance augmente significativement par rapport à celle réalisée en début de journée ($F(1,36) = 73,36$ $p < 0,0001$) (figure 4.10).

Or, l'état de fatigue des participants augmente en fin journée par rapport au matin (résultat présenté dans la suite de cette partie). Malgré le caractère contre-intuitif de ce résultat, il n'est pas isolé puisque plusieurs publications font état de résultats similaires (Folkard & Monk, 1979b; Johnson et al., 1992; Lorenzetti & Natale, 1996). Dans ces études, les performances de mémorisation sont maintenues au même niveau en début et en fin de journée. Dans l'étude de Johnson (1991), les performances de mémorisation et l'attention soutenue varient de concert avec le rythme circadien. Dans le modèle d'Achermann (Achermann & Borbély, 1994), le rythme circadien est mesuré au travers des mesures d'attention soutenue et de somnolence. Ces deux variables évoluent de façon

inversée au cours d'une journée : lorsque l'attention soutenue est maximale, la somnolence est minimale et vice-versa. Ici, la première tentative d'explication des résultats consiste à regarder s'il existe des relations possibles entre les performances de sériation et l'état de somnolence (mesuré par le questionnaire KSS) du moment 1 et 6 (correspondant au moment de passation de la tâche de sériation) des participants. Lors de cette expérience, le score de somnolence entre les moments 1 et 6 augmente légèrement (résultats montrés dans l'annexe B). Cette augmentation n'est pas significative. Néanmoins, il est possible de tester des corrélations entre la somnolence du moment 1 et 6 (début et fin de journée) et les performances de mémorisation. L'analyse de la corrélation effectuée sur les moments 1 et 6 (début et fin de journée) entre les performances de mémorisation et la somnolence ne donne aucun résultat significatif ($r^2 = 0.001$). Il n'y a pas non plus de corrélation significative entre la qualité du sommeil de la veille (mesurée par le questionnaire de Horne et Ostberg) et les performances au test du matin ($r^2 = 0.001$). Ainsi, nous ne pouvons pas expliquer l'effet du moment de la journée sur les performances de mémorisation au travers des mesures de somnolence.

La deuxième tentative d'explication de ces résultats sur la performance de mémorisation est une mesure d'attention soutenue. Selon Monk (1987), elle consiste à évaluer l'état d'activation ou la vigueur des participants à partir de questions sur la somnolence, l'effort fourni pour réaliser une tâche, certaines émotions comme la joie, la tristesse *etc.* Les mesures d'attention soutenue sont fortement corrélées avec les mesures physiologiques du rythme biologique sur 24, 36, 48 ou encore 60 heures. Lors de l'étude de (Johnson et al., 1992), les variations des performances de mémorisation lors d'une journée correspondent aux variations d'attention soutenue lors de la journée. De cette façon les auteurs concluent que le maintien des performances est dû à notre état psychophysiologique.

Par ailleurs, Thayer (Robert E. Thayer, 1986; Thayer, 1987) explique les effets du rythme circadien au travers de mesures de vigilance et tension, qui correspondent également à un état d'activation des participants. Selon Thayer, les personnes peuvent réaliser de meilleures performances en fin de journée car il existe des mécanismes compensatoires entre la vigilance et la tension. Lorsque la vigilance baisse en fin journée à cause d'une fatigue accumulée trop importante, elle peut être compensée par une augmentation de la tension. Pour Thayer, la vigilance correspond à une activation énergétique et la tension ou l'anxiété correspond à une activation tendue, ce qui explique le phénomène de compensation entre les deux. Dans notre cas, il y a une baisse significative de la vigilance entre les moments 1 et 6 et une augmentation significative de la tension, ce qui pourrait expliquer les meilleures performances de mémorisation en fin de journée par rapport à celles observées en début de journée (résultats donnés dans l'annexe B).

Ces résultats rejoignent les résultats obtenus sur des performances de mémorisation dans l'étude de (Mélan, Galy, & Cariou, 2007) chez les contrôleurs du trafic aérien. Lors de l'étude, les auteurs ont conclu que les participants maintiennent de bonnes performances de mémorisation après 6 heures de travail grâce aux mécanismes compensatoires entre la vigilance et la tension.

4.3.1.2. Performance réalisée pour la tâche de « revue de presse »

Le deuxième indicateur de performance étudié est le nombre de mots écrits (NBME) dans les synthèses des articles de presse. Le nombre de mots est un indicateur du volume de travail réalisé lors d'une journée totale d'expérience. Cet indicateur n'est mesuré qu'en fin de journée. Le comptage est fait en prenant en compte tous les mots écrits dans le document Word. Dans le cadre de cette thèse, nous n'avons pas eu le temps pour nous intéresser au sens des synthèses d'articles ni aux plagats, possibles grâce à l'accès à l'internet. Sur la figure 4.11 sont données les valeurs moyennes du NBME accompagnées de leurs intervalles de confiance, en fonction des conditions sonores. L'allure de la courbe montre que pour la condition de parole le NBME est plus petit. Les intervalles de confiance montrent que la variabilité interindividuelle est très grande. Une RM-ANOVA montre un effet significatif des conditions sonores sur le NBME ($F(2,72) = 3,43$ $p = 0,0378$). Le test post-hoc de Tukey HSD (barres horizontales) ne montre pas de différence entre la condition de bruit stationnaire et les deux autres conditions. Par contre, il y a une différence significative entre la condition du bruit modulé et celle de la parole. Ce résultat rejoint celui de (Sörqvist, Nörtl, & Halin, 2012) qui compare les performances lors d'une tâche d'écriture dans une condition de parole intelligible et dans une condition où le signal de parole est inversé spectralement autour de la fréquence de 2 kHz en utilisant la méthode de (Scott, Rosen, Beaman, Davis, & Wise, 2009). Cette méthode permet d'avoir un signal de parole sans contenu sémantique tout en conservant les mêmes modulations en amplitude (cf. voir (Blessner, 1972; Scott et al., 2009)). Les résultats de l'expérience de (Sörqvist et al., 2012) montrent une baisse significative des performances réalisées en présence de parole intelligible par rapport à celles réalisées en présence d'un signal de parole incompréhensible et modulé également en amplitude. Ils concluent que cette baisse de performance est due à l'information sémantique apportée par la parole intelligible lors de la réalisation d'une tâche qui demande un traitement simultané de l'information verbale.

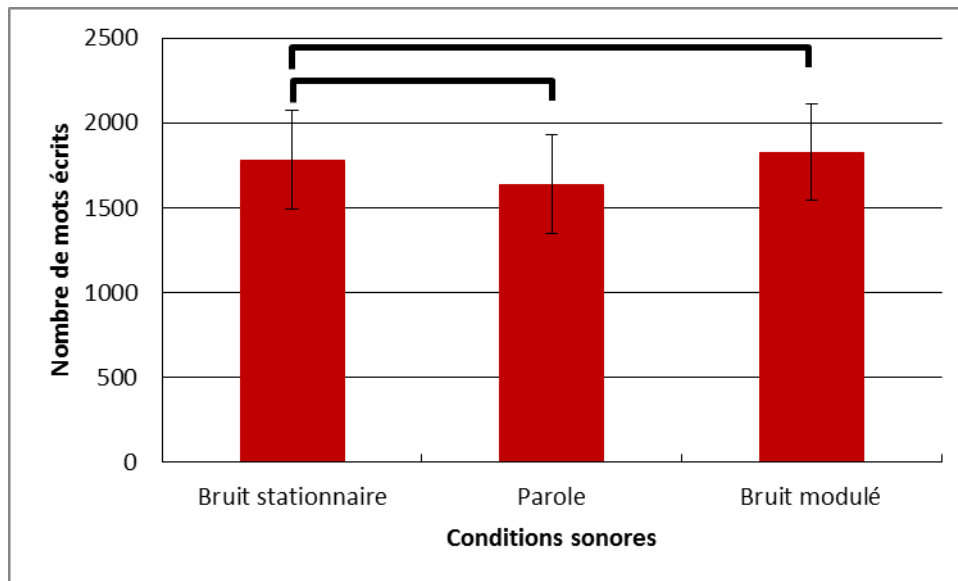


Figure 4.11. Moyennes et intervalles de confiance du nombre de mots écrits lors de la revue de presse en fonction des conditions sonores.

4.3.2. Mesures subjectives

4.3.2.1. Évaluation subjective de l'environnement sonore

L'environnement sonore a été évalué à partir de trois questions dont le mode de réponse est basé sur une échelle visuelle analogique (EVA) allant de 0 à 100. Les participants devaient répondre si l'environnement sonore était plutôt calme ou bruyant, plutôt gênant ou non et plutôt fatigant ou non. Sur la figure 4.12 et 4.13, sont présentées les valeurs moyennes et les intervalles de confiance des réponses à ces questions en fonction de la condition sonore pour les dimensions calme-bruyant et gêne sonore et en fonction des conditions sonores et du moment de la journée pour la fatigue sonore. Pour la fatigue sonore, les moments 1 et 4 ne sont pas affichés et ne sont pas pris en compte dans les analyses statistiques, car ils correspondent à des moments de silence dans la salle.

Une RM-ANOVA à deux facteurs sur le score de la composante « Calme-Bruyant » montre un effet significatif ($F(2,72) = 8,63$ $p < 0,001$) des conditions sonores sur cette dimension. Un test post-hoc de Tukey, présenté dans le tableau 4.3, montre une différence significative entre les trois conditions, la condition considérée comme la moins bruyante étant la condition stationnaire puis le bruit de parole et enfin le bruit modulé. En revanche, il n'y a pas d'effet significatif du moment de la journée ($F(3,108) = 1,11$ $p = 0,3477$) sur la dimension « Calme-Bruyant ». Le tableau est séparé en deux parties : celle du haut qui affiche les résultats du post-hoc de Tukey pour le facteur « conditions sonores » et celle du bas qui affiche les résultats pour le facteur « moment de la journée ». Les

lettres A et B correspondent au classement des modalités des deux facteurs étudiés. Lorsqu'à deux modalités différentes d'un facteur est attribuée la même lettre, les moyennes mesurées ne sont pas significativement différentes. Lorsque deux modalités ne partagent aucune lettre, les moyennes mesurées sont significativement différentes. Chaque colonne du tableau correspond à une variable mesurée. Dans la suite de cette partie, le trait « - » affiché dans les tableaux indique l'absence de mesure lors de l'analyse et « pas d'effet » signifie un résultat non-significatif à l'ANOVA.

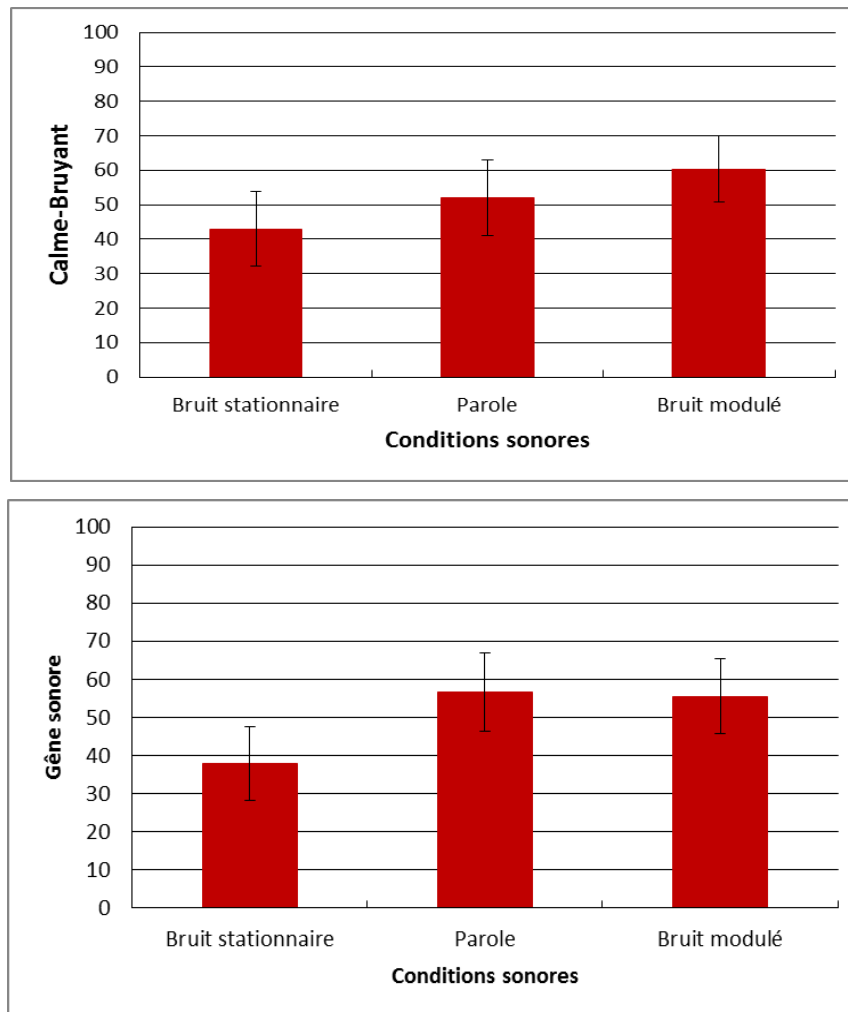


Figure 4.12. Perception de l'environnement sonore (moyennes et intervalles de confiance) selon les dimensions calme-bruyant (en haut) et gêne sonore (en bas) en fonction des conditions sonores

Une RM-ANOVA à deux facteurs montre un effet significatif des conditions sonores sur la gêne sonore ($F(2,72) = 12,31$ $p < 0,0001$). Le test post-hoc de Tukey (cf. tableau 4.3) montre une différence

significative entre la condition de bruit stationnaire et les deux autres conditions. Les participants s'estiment plus gênés par le bruit modulé et la parole que par le bruit stationnaire. Comme pour la dimension « Calme-Bruyant », la gêne sonore reste constante durant toute la journée. Il n'y a pas d'effet significatif du moment de la journée ($F(3,108) = 0,51$ $p = 0,6741$) sur cet indicateur.

Le dernier indicateur utilisé pour l'évaluation des effets de l'environnement sonore est la fatigue sonore. Comme précédemment, une RM-ANOVA à deux facteurs montre un effet significatif des conditions sonores sur la fatigue sonore ($F(2,72) = 7,34$ $p = 0,0013$), avec, comme pour la gêne sonore, une différence significative entre la condition de bruit stationnaire et les deux autres conditions (cf. tableau 4.3). Contrairement aux deux dimensions précédentes, il existe un effet significatif du moment de la journée ($F(3,108) = 9,47$ $p < 0,0001$). Les participants estiment que le bruit devient de plus en plus fatigant au fur et à mesure que la journée avance, quel que soit la condition sonore.

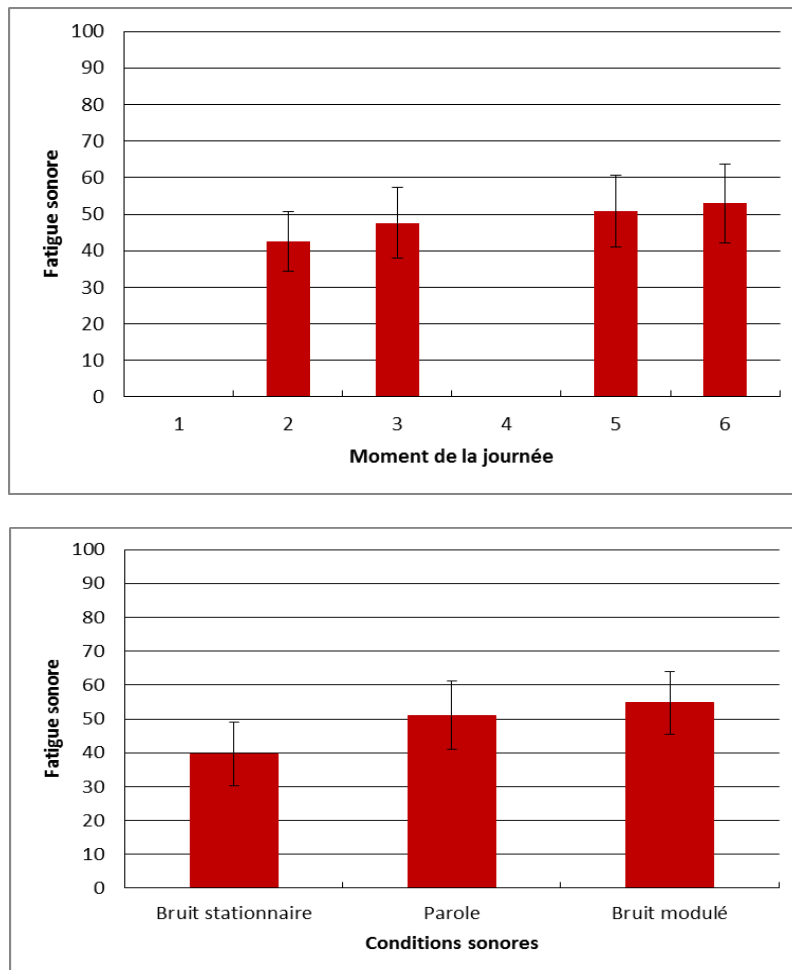


Figure 4.13. Fatigue sonore (moyennes et intervalles de confiance) en fonction du moment de la journée (en haut) et des conditions sonores (en bas)

Une analyse de variance est également réalisée sur les seules mesures du matin. Pour les trois indicateurs, il existe un effet significatif des conditions sonores (« calme – bruyant » $F(2,75) = 7,45$ $p = 0,0011$; gêne sonore $F(2,75) = 14,03$ $p < 0,0001$; fatigue sonore $F(2,75) = 7,70$ $p = 0,0009$). Les résultats de Tukey montrent une augmentation significative des trois indicateurs pour les conditions du bruit modulé et parole par rapport au bruit stationnaire. De plus, pour les mesures effectuées le matin, l'analyse statistique montre un effet du moment de la journée sur la fatigue sonore ($F(1,38) = 7,07$ $p = 0,0114$) pour les trois conditions sonores.

Ces résultats apportent des éléments complémentaires aux résultats trouvés précédemment lors des expériences de courte durée (Brocolini et al., 2016; S. J. Schlittmeier et al., 2008). En effet, les trois dimensions (« calme-bruyant », gêne sonore et fatigue sonore) montrent que la parole ou le bruit modulé ne sont pas perçus seulement plus gênants, comme dans les expériences précédentes, mais aussi plus bruyants et plus fatigants. De plus, dans le cas d'une expérience de longue durée, nous découvrons que le bruit, quelle que soit la condition, devient de plus en plus fatigant quand le temps de l'exposition sonore est supérieur à deux heures. De ce fait, l'utilisation de la question sur la fatigue sonore peut être conseillée pour des enquêtes *in-situ* avec de multiples observations lors d'une journée de travail.

Conditions			
Variable	Gêne sonore	Fatigue sonore	Calme-Bruyant
Bruit stationnaire	A	A	A
Bruit modulé	B	B	C
Parole	B	B	B
Moment de la journée			
Variable	Gêne sonore	Fatigue sonore	Calme-Bruyant
1	-	-	-
2	Pas d'effet	A	Pas d'effet
3	Pas d'effet	B	Pas d'effet
4	-	-	-
5	Pas d'effet	BC	Pas d'effet
6	Pas d'effet	C	Pas d'effet

Tableau 4.3. Tests post-hoc de Tukey pour les indicateurs d'évaluation subjective de l'environnement sonore

4.3.2.2. *Fatigue psychologique*

Le questionnaire de MFI 20 donne deux dimensions distinctes de la fatigue : la fatigue générale et la fatigue mentale. Sur la figure 4.14 sont présentées les valeurs moyennes accompagnées de leur intervalle de confiance à 95 % de la fatigue générale (haut) et de la fatigue mentale (bas). Les deux indicateurs varient entre 1 et 5. La figure 4.14 montre que les deux dimensions de la fatigue varient modérément. Pour les deux dimensions, il y a un effet significatif du moment de la journée ($F(5,190) = 7,32$ $p < 0,0001$ pour la fatigue générale et $F(5,190) = 9,51$ $p < 0,0001$ pour la fatigue mentale). Dans le tableau 4.4 sont donnés les groupes des tests post-hoc de Tukey après une RM-ANOVA à deux facteurs pour chaque variable liée à l'état de l'individu. Ces facteurs sont les conditions sonores et le moment de la journée. D'après ce tableau, pour les deux dimensions de fatigue, il y a une augmentation significative du score en fin de journée.

Concernant les conditions sonores, il existe une différence significative seulement pour la fatigue mentale ($F(2,75) = 7,10$ $p = 0,0015$). Le post-hoc de Tukey montre des différences significatives entre les trois conditions sonores. La condition de parole ressort comme la condition la plus fatigante mentalement, le bruit modulé occupant une position intermédiaire entre la parole et le bruit stationnaire (Moyenne_bruit_st. = 2,24 ; Moyenne_bruit_modulé = 2,36 ; Moyenne_parole = 2,55). Nous observons également les mêmes effets significatifs sur la fatigue mentale pour les trois premières mesures de la journée (les mesures faites le matin). La fatigue mentale augmente significativement avec les conditions sonores pour lesquelles le bruit présente des modulations ($F(2,75) = 4,92$ $p = 0,0098$). Le test post-hoc de Tukey montre une différence significative entre la condition du bruit stationnaire et les deux autres conditions. De plus, l'effet du moment de la journée est significatif ($F(2,76) = 4,76$ $p = 0,0113$) et les participants s'estiment plus fatigués à partir de deux heures d'exposition sonore.

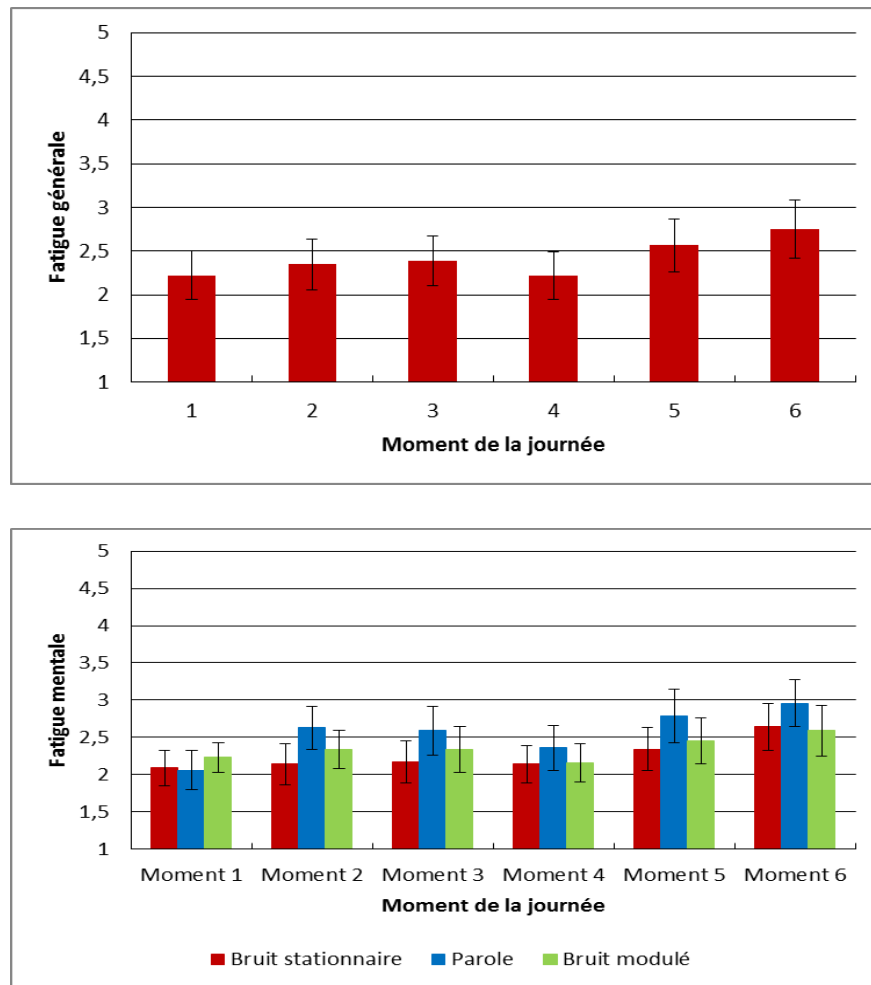


Figure 4.14. Fatigue générale (haut) et fatigue mentale (bas) en fonction du moment de la journée, pour chaque condition sonore.

Jusqu'à présent, en comparant les résultats de la fatigue mentale avec ceux de la fatigue sonore, il semblerait que l'impact du bruit modulé et de la parole sur l'état psychologique des participants soit plus important que l'impact du bruit stationnaire. De plus, pour la fatigue mentale, il existe également un effet significatif de l'interaction entre les conditions sonores et le moment de la journée ($F(10,370) = 3,13$ $p = 0,0007$). Cet effet peut être observé au travers des résultats présentés sur la figure 4.14 (bas). Lors du moment 1, la fatigue mentale est évaluée de la même façon pour les trois conditions de bruit. Or, dès la deuxième évaluation (moment 2), les participants manifestent, pour la condition de parole, une fatigue mentale significativement supérieure au moment 1, ce qui n'est pas le cas pour les deux autres conditions sonores. Pour le bruit stationnaire et le bruit modulé, cette augmentation de fatigue mentale ne se relève qu'en fin de journée (résultats du post-hoc de Tukey HSD du terme croisé conditions sonore*moment de la journée dans annexe B). Ces résultats

montrent que la parole se distingue nettement des deux autres conditions avec un effet plus précoce sur la fatigue mentale des participants.

Conditions sonores		
	Fatigue générale	Fatigue mentale
Bruit stationnaire	Pas d'effet	A
Bruit modulé	Pas d'effet	B
Parole	Pas d'effet	C
Moment de la journée		
	Fatigue générale	Fatigue mentale
1	AB	B
2	AB	A C
3	B	A
4	A	AB
5	C	C
6	C	D

Tableau 4.4. Test post-hoc de Tukey pour la fatigue générale et la fatigue mentale

4.3.2.3. Charge mentale de travail

Dans cette partie, on analyse les effets des deux variables (moment de la journée et conditions sonores) sur la charge mentale de travail avec ses quatre dimensions : les ressources disponibles (RI), la charge externe (CE), la charge intrinsèque (CI) et la charge essentielle (CP). Les quatre dimensions ne sont mesurées que lors de quatre moments de la journée (le 2, le 3, le 5 et le 6). Lors du moment 1 (prise de poste du matin) et du moment 4 (prise de poste l'après-midi), il n'y a pas eu d'évaluation de la charge mentale de travail. Pour le moment 1, aucun travail n'avait encore été réalisé sur la tâche de revue de presse. Pour le moment 4, les participants revenaient dans la salle après la pause du midi et leur travail précédent avait déjà été évalué au moment 3, juste avant cette même pause. Sur la figure 4.15 (haut), sont présentées les valeurs moyennes de l'indicateur RI accompagnées des intervalles de confiance à 95 %, en fonction du moment de la journée et pour chaque condition sonore. L'indicateur varie entre 1 et 8, 1 signifiant que les ressources disponibles pour effectuer la tâche de revue de presse sont minimales et 8 que ces ressources sont maximales. Une RM-ANOVA à deux facteurs montrent un effet significatif ($F(3,114) = 10,07$ $p < 0,0001$) du moment de la journée

sur la composante RI. Un test post-hoc de Tukey (tableau 4.5) montre une différence significative entre le matin et l'après-midi, pour les trois conditions sonores. En revanche, le niveau de ressources reste identique pour les trois conditions sonores puisqu'il n'y a pas d'effet significatif des conditions sonores ($F(2,76) = 1,67$ $p = 0,1961$).

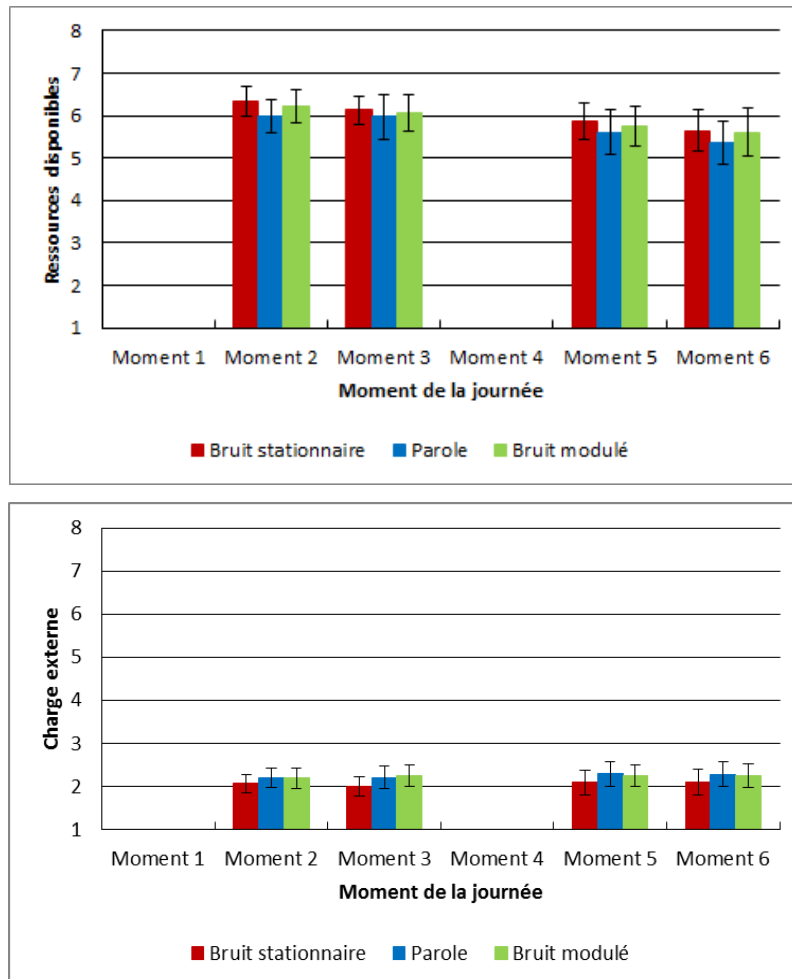


Figure 4.15. Ressources disponibles RI (haut) et charge externe CE (base) en fonction du moment de la journée pour chaque condition sonore.

En bas de la figure 4.15 sont présentées les valeurs moyennes de la charge externe CE, accompagnées de leurs intervalles de confiance à 95 %, en fonction du moment de la journée et pour chaque condition sonore. Comme pour les ressources disponibles, l'indicateur varie entre 1 et 8, 1 signifiant que la charge externe est minimale et 8 que cette charge est maximale. Les résultats présentés sur la figure 4.15 (bas) montrent que la CE se situe sur de faibles valeurs. Une RM-ANOVA à deux facteurs en fonction des conditions sonores et du moment de la journée montre un effet significatif ($F(2,76) = 3,34$ $p = 0,0408$) du bruit sur la charge externe. De plus, le test post-hoc de

Tukey (tableau 4.5) montre un effet plus important des modulations d'amplitude du bruit (blanc ou de parole) sur la charge externe (i.e. différence significative entre le bruit stationnaire et les deux autres conditions). Quant au moment de la journée, l'ANOVA ne montre pas d'effet significatif de cette variable sur la charge externe ($F(3,114) = 1,14$ $p = 0,3361$).

En haut de la figure 4.16 sont données les valeurs moyennes de la CI accompagnées de leurs intervalles de confiance à 95 %, en fonction du moment de la journée et pour chaque condition sonore. Comme précédemment, l'indicateur varie entre 1 et 8, 1 signifiant que la charge est minimale et 8 que cette charge est maximale.

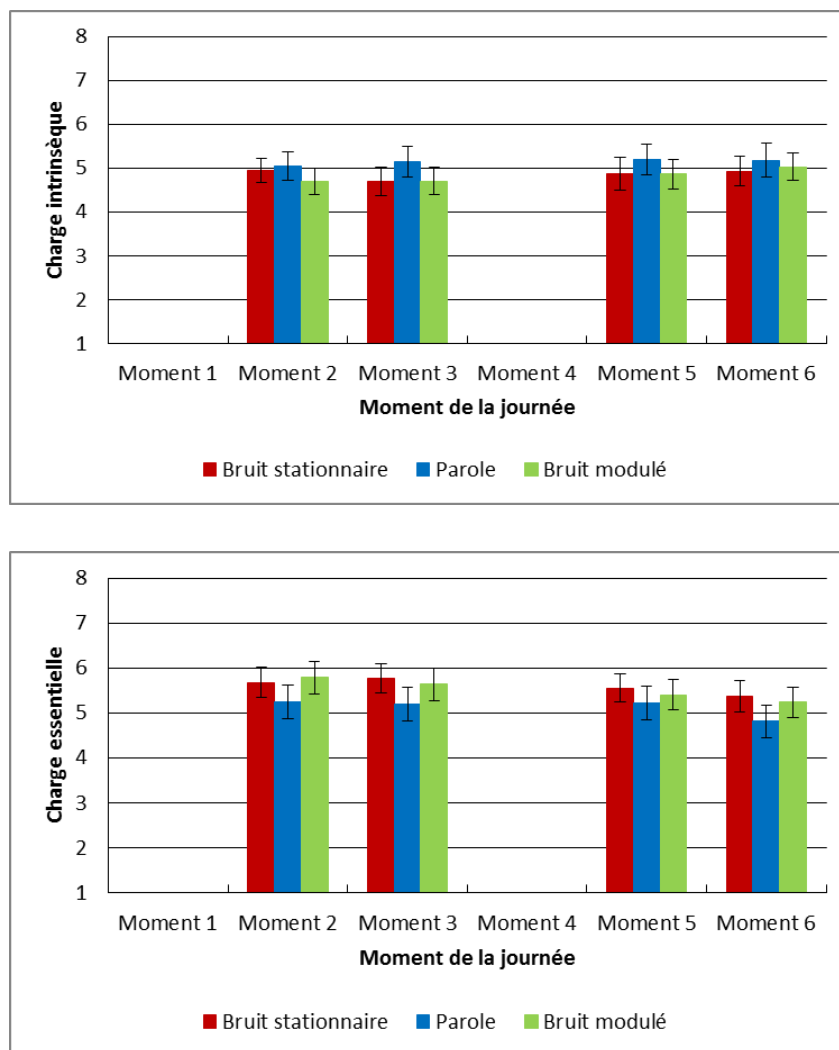


Figure 4.16. Charge intrinsèque à la tâche (haut) et charge essentielle (bas) en fonction du moment de la journée, pour chaque condition sonore.

Comme pour les indicateurs précédents, une RM-ANOVA à deux facteurs est réalisée pour observer l'effet du moment de la journée et des conditions sonores. Les résultats montrent un effet significatif

des deux variables sur la CI (moment de la journée : $F(3,114) = 4,75$ $p = 0,0038$ et conditions sonores : $F(2,76) = 5,67$ $p = 0,0052$). Les participants se déclarent plus chargés cognitivement en fin de journée. De plus, lorsque ce bruit est la parole intelligible, la CI augmente significativement. Ces résultats sont montrés dans le tableau 4.5 du test post-hoc de Tukey.

A partir de l'ensemble de ces résultats, nous pouvons déjà constater qu'il existe un effet des conditions sonores sur la charge mentale de travail (la charge intrinsèque et la charge externe). En ce qui concerne les ressources disponibles, le fait qu'il n'y ait pas d'effet des conditions sonores montre que les participants possèdent les mêmes ressources pour effectuer la tâche dans les trois conditions sonores. En revanche, la charge perçue n'est pas la même. En prenant les deux dimensions (externe et intrinsèque) de la charge séparément, on remarque d'abord un effet des modulations d'amplitudes (bruit blanc et parole) sur la charge externe. Cette dernière est liée directement aux conditions auxquelles les participants sont confrontés (Galy et al., 2012). A part les conditions sonores, toutes les autres caractéristiques de l'environnement sont inchangées. De ce fait, les variations de la charge externe d'une condition à l'autre sont bel et bien dues aux variations des conditions sonores.

Ensuite, il y a un effet des conditions sonores sur la charge intrinsèque due à la tâche. En principe, cette dimension ne doit pas varier en fonction des conditions sonores car la difficulté de la tâche ne change pas. Or, ici les résultats montrent un effet des conditions sonores sur cette dimension. Plus précisément, il y a une différence significative entre la condition de parole et les deux autres conditions. Les participants ressentent une charge intrinsèque plus importante lors de la condition de parole. La tâche à effectuer consiste à traiter de l'information verbale en utilisant des processus de mémorisation (Flower & Hayes, 1981; van de Poll et al., 2014). Quand les participants se retrouvent dans un environnement contenant de la parole, le signal à traiter par le participant dû à cet environnement perturbe les processus cognitifs mis en jeu dans la tâche réalisée et interfère avec les mécanismes de mémorisation (Salamé & Baddeley, 1982). Ces perturbations rendent la réalisation de la tâche de travail plus difficile que dans un environnement sonore composé d'un bruit blanc modulé ou non, et cela apparaît dans l'évaluation de la charge intrinsèque due à la tâche.

Enfin la dernière dimension de la charge mentale de travail est la charge essentielle. En bas de la figure 4.16, sont données les valeurs moyennes de la CP accompagnées des intervalles de confiance à 95 %, en fonction du moment de la journée et pour chaque condition sonore.

Cette dimension correspond au coût que représente la mise en œuvre de stratégies de régulation de l'activité. Selon (Galy, 2017), plusieurs facteurs jouent sur la charge essentielle. D'abord cette charge est élevée quand les ressources restantes sont élevées (figure 2.7). Les ressources restantes sont une

différence entre les ressources disponibles et les ressources obligatoirement utilisées. Ces dernières sont représentées par les charges externe et intrinsèque. Lorsque les participants possèdent des ressources restantes suffisantes, ils sont capables de mettre en place des stratégies de régulation de l'activité. C'est à ce moment-là qu'ils ressentent une charge supplémentaire due à la mise en place de ces stratégies. Lorsqu'on regarde l'effet des conditions sonores sur la charge essentielle, on remarque qu'il y a une différence significative entre la condition de parole et les deux autres conditions ($F(2,76) = 9,67$ $p = 0,0002$). La charge essentielle est plus faible pour la condition de parole. Ceci est confirmé par le fait que les ressources restantes devraient être plus faibles dans la condition parole compte tenu d'une charge intrinsèque significativement plus élevée que dans les deux autres conditions.

De la même façon, l'effet du moment de la journée n'est significatif que sur les ressources disponibles, la charge intrinsèque et la charge essentielle ($F(3,114)=9,79$ $p<0,001$). Lorsque les participants avancent dans la journée de travail, les ressources disponibles et la charge essentielle diminuent. De plus, la charge intrinsèque augmente et la tâche semble devenir de plus en plus coûteuse. En revanche, il n'apparaît pas d'effet du moment de la journée sur l'estimation de la charge externe, ce qui est compréhensible car le bruit reste le même toute la journée.

Pour finir, les derniers résultats consistent à regarder si les effets des conditions sonores se manifestent lors de la matinée des journées d'expérience. Pour les trois indicateurs (CI, CE et CP), les effets des conditions sonores sont exactement les mêmes que les résultats pour une journée entière. Les post-hocs de Tukey sur la demi-journée confirment la même hiérarchie entre les trois conditions sonores que pour une journée entière.

Conditions				
Variable	Ressources disponibles	Charge externe	Charge intrinsèque	Charge essentielle
Bruit stationnaire	Pas d'effet	A	A	A
Bruit modulé	Pas d'effet	B	A	A
Parole	Pas d'effet	B	B	B
Moment de la journée				
Variable	Ressources disponibles	Charge externe	Charge intrinsèque	Charge essentielle
1	-	-	-	-
2	B	Pas d'effet	A	A
3	B	Pas d'effet	A	AB
4	-	-	-	-
5	A	Pas d'effet	AB	B
6	A	Pas d'effet	B	C

Tableau 4.5. Résultats du test post-hoc de Tukey pour les indicateurs d'évaluation de la charge mentale de travail et du nombre de mots écrits dans les synthèses d'articles.

4.3.2.4. Modèle Individu-Charge-Activité (ICA)

4.3.2.4.1. Résultats

Pour consolider les résultats présentés auparavant et toutes les mesures réalisées lors de cette expérience, il existe un modèle proposé par (Galy et al., 2012) qui met en relation ces mesures en séparant les variables selon trois catégories différentes :

- « Individu » qui correspond aux mesures faites sur l'état psychologique (fatigue, vigilance, tension et somnolence), la perception de l'environnement de travail (« calme-bruyant », gêne sonore et fatigue sonore) et les capacités cognitives des participants (performances réalisées lors de la tâche de sériation)

- « Charge » qui correspond aux mesures faites sur les différentes dimensions de la charge de travail
- « Activité » qui correspond aux conditions sonores de l'environnement.

Ce modèle, appelé ICA (Individu-Charge-Activité), donne un aperçu du processus de réalisation d'un travail au travers des mesures de charge mentale de travail lorsque les participants sont soumis à des conditions particulières de travail. Cette charge perçue par les participants se trouve au centre du modèle. Elle est expliquée par la catégorie « individu » et elle explique les performances lors de l'activité de travail des participants.

Pour tester ce modèle, une méthode différente d'analyse statistique est utilisée, appelée GAM (Modèle Additif Généralisé (Guisan, Edwards Jr, & Hastie, 2002; Hastie, 2017)). Ces analyses sont mathématiquement basées sur les modèles communs des régressions linéaires décrits comme suit :

$$y = \alpha + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_i x_i \quad (1)$$

Où y est la variable mesurée, (x_i) le jeu des variables explicatives, α et β_i des constantes. Les GAM s'écrivent en remplaçant les coefficients linéaires β_i par des fonctions d'une forme plus générale :

$$y = \alpha + f_1(x_1) + f_2(x_2) + \dots + f_i(x_i) \quad (2)$$

Où, y et x_i restent les mêmes et f_i sont des fonctions non-paramétriques établies à partir des variables mesurées x_i . Alors que la forme non-paramétrique des fonctions f_i rend le modèle plus flexible, l'additivité reste une propriété et nous permet d'utiliser ces modèles de la même façon que les modèles de régression linéaire.

Des GAM ont donc été réalisés sur les différentes dimensions du questionnaire ICA (ressources disponibles, charges intrinsèque, externe et essentielle). Des résultats complémentaires pour le modèle complet sont donnés dans l'annexe B.

Concernant les ressources disponibles, parmi un certain nombre de modèles testés, celui qui explique le pourcentage de variance des ressources disponibles le plus élevé ($R^2 = 0,837$ variance expliquée (« deviance explained ») = 84,1 %), est le modèle prenant en considération l'interaction entre la vigilance et la tension ($F = 19,08$ $p < 0,0000$), la fatigue générale ($F = 45,26$ $p < 0,0001$) et la somnolence ($F = 28,82$ $p < 0,0001$). Sur la figure 4.17 sont représentées les relations entre les RI et 1) l'interaction entre la vigilance et la tension (en haut à gauche), 2) la fatigue générale (en haut à droite) et 3) la somnolence (en bas à gauche). La couleur rouge sur le premier graphique (en haut à gauche) correspond à des ressources disponibles en dessous du score moyen et la couleur jaune correspond à des ressources disponibles au-dessus du score moyen.

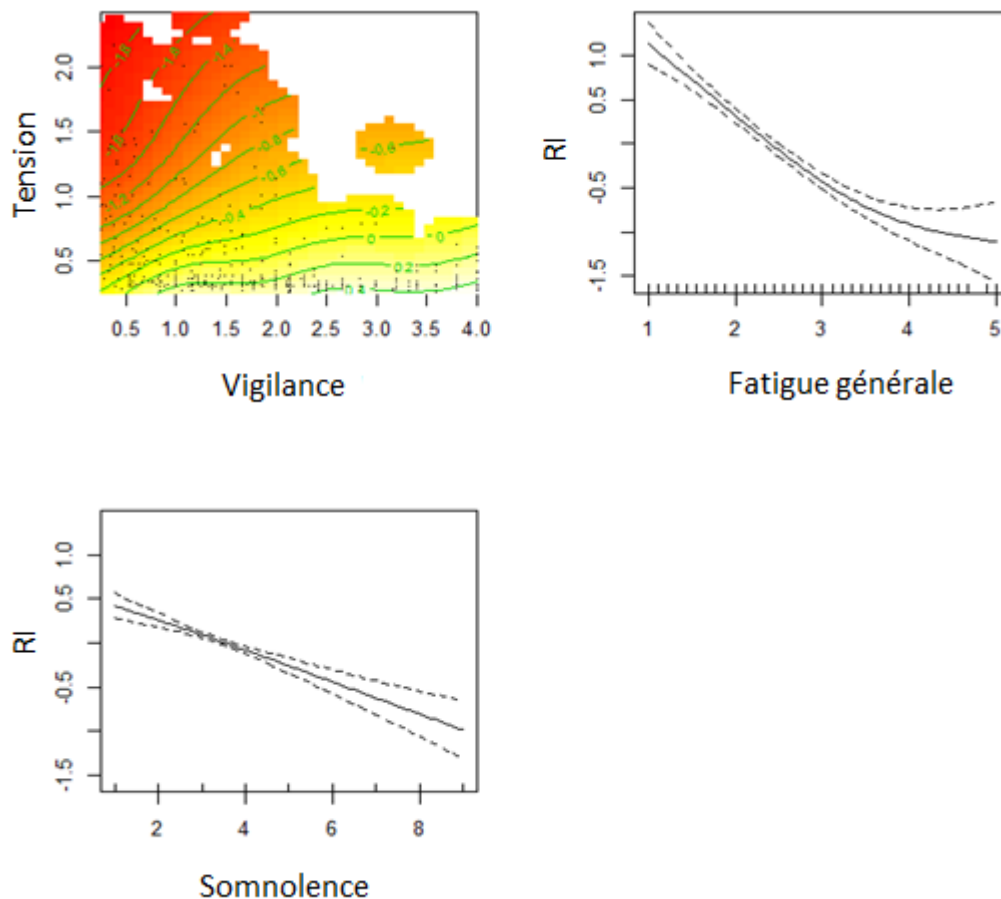


Figure 4.17. Les RI en fonction de l'interaction vigilance-tension (en haute à gauche), de la fatigue générale (en haut à droite) et de la somnolence (bas).

Pour une tension faible (tension < 0,5), les ressources disponibles ne sont pas affectées par les variations de la vigilance. En revanche, lorsque la tension augmente, les ressources disponibles deviennent plus faibles et sensibles aux variations de la vigilance. Pour une tension élevée, lorsque la vigilance est basse les ressources disponibles sont basses et lorsque la vigilance augmente les ressources disponibles augmentent également.

Les deux autres relations sont plutôt linéaires : lorsque la fatigue et la somnolence augmentent, les ressources disponibles diminuent.

Ces quatre facteurs varient au cours de la journée de travail, comme des études antérieures le montrent également (Achermann & Borbély, 1994; Folkard & Monk, 1980; Robert E. Thayer, 1986; Thayer, 1987), et expliquent la baisse des ressources disponibles au cours de la journée.

La deuxième dimension étudiée est celle de la charge externe (CE). Le modèle qui explique la part de variance la plus élevée de la CE ($R^2 = 0,42$ variance expliquée (« deviance explained ») = 42,7 %)

prend en considération l'évaluation de l'environnement « calme-bruyant » ($F = 3,877$ $p = 0,0189$), la gêne sonore ($F = 2,765$ $p = 0,0311$) et la fatigue sonore ($F = 12,173$ $p = 0,0005$). Sur la figure 4.18 sont montrés les résultats de ce modèle. En ordonnée est représenté l'écart à la moyenne du score de la CE et en abscisse sont représentés les scores de la fatigue sonore (en haut à gauche), de la gêne sonore (en haut à droite) et de l'évaluation de l'environnement « calme-bruyant » (en bas).

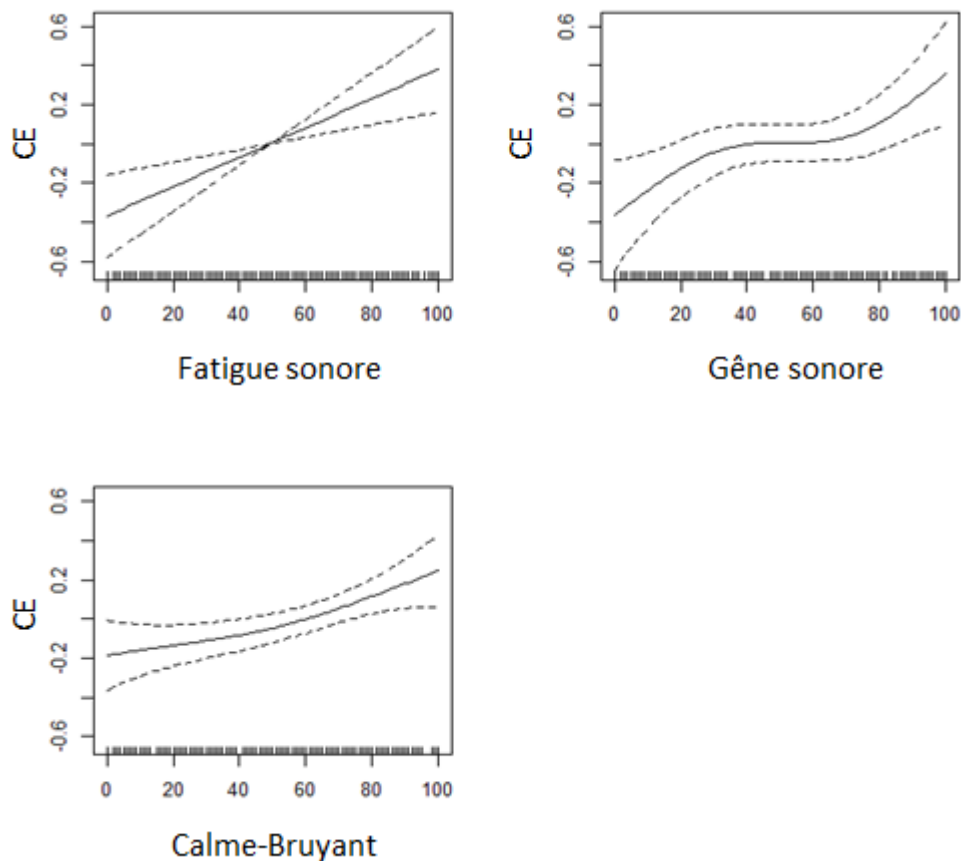


Figure 4.18. La CE en fonction des trois dimensions d'évaluation subjective de l'environnement sonore : fatigue sonore (en haut à gauche), gêne sonore (en haut à droite) et « calme-bruyant » (bas)

Pour les trois relations, la charge externe augmente lorsque l'environnement sonore devient plus fatigant, plus gênant et plus bruyant. Il est intéressant de remarquer, sur ce modèle, une corrélation forte entre la charge externe et la fatigue sonore. Cette dernière est une nouvelle dimension de la perception sonore ajoutée lors de cette thèse, et ce résultat confirme l'intérêt de l'utilisation de cette dimension supplémentaire lors des études sur le bruit ambiant.

Les trois indicateurs varient principalement en fonction des conditions sonores et expliquent de façon cohérente les variations de la CE en fonction des conditions sonores.

Le troisième indicateur de la charge mentale de travail est la charge intrinsèque due à la tâche (CI). Le modèle qui explique la plus grande part de variance de la CI ($R^2 = 0,14$ variance expliquée (« deviance explained ») = 16,2 %) comprend l'interaction entre les conditions sonores et les capacités cognitives des participants mesurées par les performances de mémorisation le matin ($F = 9,282$ $p < 0,0001$). Cette analyse est montrée sur la figure 4.19. Sur cette figure est représentée la CI (en couleur) en fonction des performances de mémorisation le matin en ordonnée et les conditions sonores en abscisse. La couleur rouge représente une CI plus basse que la moyenne et la couleur jaune représente une CI plus haute que la moyenne.

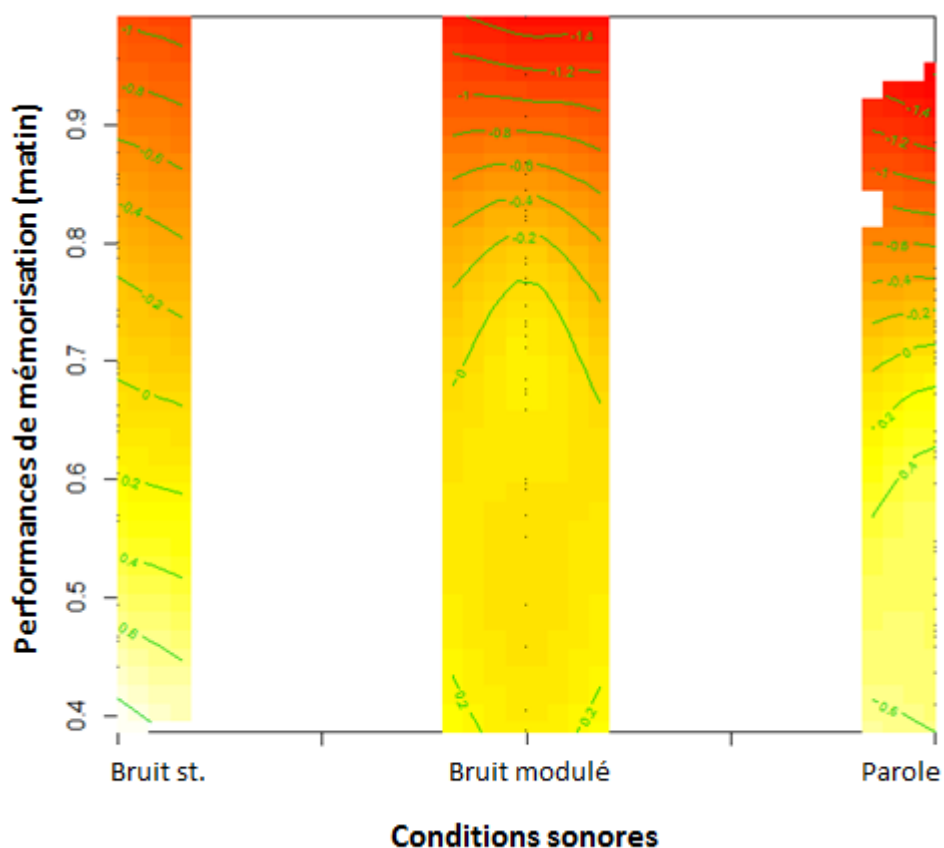


Figure 4.19. La CI en fonction de l'interaction performances de mémorisation (matin) – conditions sonores

Sur cette figure, la CI baisse lorsque les performances de mémorisation augmentent. Plus les participants sont performants dans la tâche de mémorisation du matin, moins ils ressentent la charge due à la réalisation de la tâche de revue de presse comme élevée. Cette relation reste la même pour les trois conditions sonores. Cependant, lors de la condition de parole, cette CI augmente légèrement. Ce résultat reste cohérent avec les résultats de l'analyse de la variance pour la CI.

La dernière dimension de la charge mentale de travail est la charge essentielle (CP). Dans le modèle présenté dans le chapitre de l'état de l'art, la CP est une résultante des trois autres dimensions de la charge mentale de travail. Ainsi, lors des analyses, le modèle qui explique la part de variance de la CP la plus élevée ($R^2 = 0,389$ variance expliquée (« deviance explained ») = 39,6 %), est le modèle prenant en considération l'interaction entre les RI et la CE ($F = 56,423$ $p < 0,0001$) et la CI ($F = 8,342$ $p < 0,0001$). Sur la figure 4.20 est représentée la CP en fonction de l'interaction RI-CE (à gauche) et de la CI (à droite). Sur le graphique de gauche, la couleur rouge représente les valeurs les plus basses de la CP et le jaune/blanc représente les valeurs les plus élevées de la mesure de la CP.

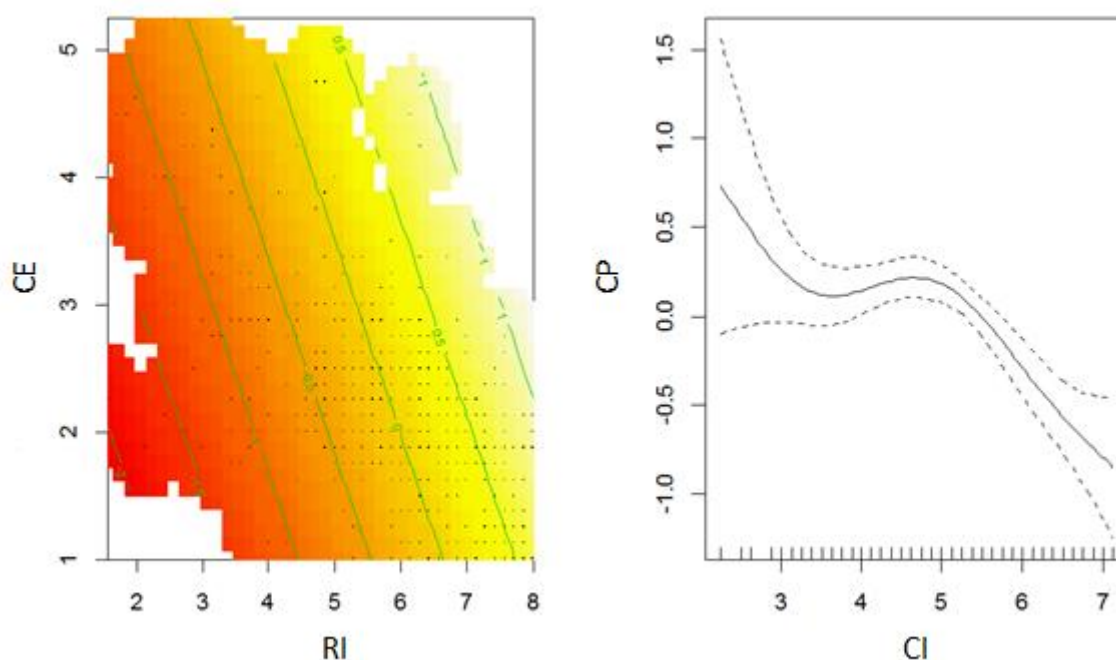


Figure 4.20. La CP en fonction de l'interaction RI-CE (à gauche) et de la CI (à droite)

Pour l'interaction RI-CE (le graphique de gauche), la CP est peu sensible aux variations de la CE. Cependant, lorsque les RI sont élevées et la CE est basse (la zone en bas et à droite du graphique), l'analyse montre que la CP est élevée. Cela traduit le fait que lorsque les conditions extérieures ne représentent pas une charge élevée pour les participants et qu'ils ont les ressources suffisantes disponibles, ils arrivent à mettre en place des stratégies de régulation de l'activité (représentées par la CP) pour effectuer leurs tâches au mieux. En revanche, lorsque les RI sont faibles, la CP diminue quelle que soit la valeur de la CE.

Pour l'effet de la CI (le graphique de droite), le graphique montre une relation non linéaire entre la CI et la CP. En effet, la CP diminue lorsque la CI augmente dans la première partie de la courbe avec des valeurs de CI comprises entre 2 et 3,5. Ensuite la CP reste stable, voire ré-augmente légèrement, jusqu'à une valeur de CI de 5. Enfin, la CP diminue à nouveau pour des valeurs de CI comprises entre 5 et 7. Ainsi, lorsque la CI est faible et donc que la tâche de revue de presse est perçue comme étant facile, les participants semblent être capables de mettre en œuvre des stratégies de régulation de l'activité. Au-delà la tâche serait trop difficile. Ce résultat peut s'expliquer par le fait que les participants n'ont que peu d'expertise dans la tâche demandée. Ainsi, malgré des RI et des capacités cognitives suffisantes, les participants ne possèdent pas assez de connaissances sur la tâche pour mettre en place des stratégies de régulation efficaces.

Pour finaliser l'analyse, les dernières mesures considérées sont les performances réelles à la tâche de revue de presse au travers du nombre de mots écrits. Le modèle qui explique la part de variance expliquée la plus élevée du nombre de mots écrits (NBME) ($R^2 = 0,141$ variance expliquée (« deviance explained ») = 15 %) prend en considération la CP ($F = 5,767$ $p = 0,01$) et les capacités cognitives de mémorisation le matin ($F = 16,119$ $p < 0,0001$). Sur la figure 4.21 sont représentées les performances réelles (en ordonnée) en fonction de la CP (à gauche) et de la performance de mémorisation à la tâche de sériation du matin.

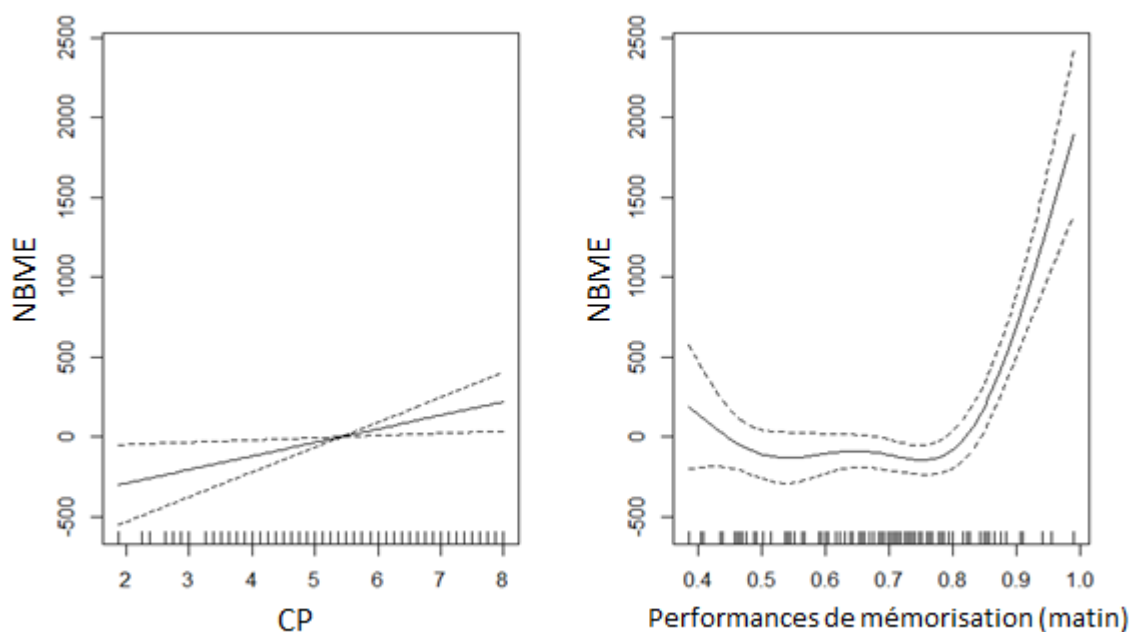


Figure 4.21. Le nombre de mots écrits en fonction de la CP (à gauche) et des performances de mémorisation le matin (à droite)

Sur le graphique de gauche nous observons des variations assez faibles, mais la figure montre une relation linéaire entre le NBME et la CP. Cette relation indique que plus la CP augmente plus le NBME augmente. Ainsi, plus les participants sont capables de mettre en œuvre des stratégies de régulation, plus les performances à la tâche de revue de presse augmentent.

Par ailleurs, la relation entre les capacités de mémorisation sérielle et les performances à la tâche de revue de presse n'est pas linéaire (graphique de droite). Lorsque les participants présentent des capacités de mémorisation faibles ou modérées, les performances à la tâche de revue de presse restent stables et présentent une valeur moyenne (graphique de droite). Lorsque les capacités de mémorisation des participants sont élevées, les performances à la tâche de revue de presse augmentent considérablement.

Cette dernière analyse montre une variance expliquée relativement basse par rapport aux autres analyses présentées dans ce paragraphe. Cela proviendrait de l'indicateur choisi pour mesurer les performances lors de la revue de presse. Le NBME est un indicateur qui peut nous donner une première information sur les performances réalisées par les participants lors de la revue de presse mais il n'évalue pas la qualité de travail des participants. De plus, les phénomènes psychologiques pour lesquels les facteurs explicatifs peuvent être très nombreux. Ainsi, 15% de variance expliquée par peu de facteurs démontrent que ces facteurs doivent être pris en considération.

4.3.2.4.2. *Modèle ICA*

Finalement, tous les résultats présentés lors de cette partie et dans l'annexe B nous permettent de présenter sur la figure 4.22 (ci-dessous) un modèle ICA explicatif qui met en relation toutes les mesures réalisées lors de cette expérience. Comme dans le modèle ICA d'origine (Galy et al., 2012), le modèle représenté est séparé en trois parties :

- les mesures faites sur l'individu qui comprennent son état psychologique, ses capacités cognitives et les RI
- les mesures de la charge mentale de travail avec les trois dimensions du questionnaire (CI, CE et CP)
- sa perception de l'environnement de travail (environnement sonore) tout au long de la journée pour les trois conditions sonores différentes et les mesures faites sur l'activité de revue de presse (NBME)

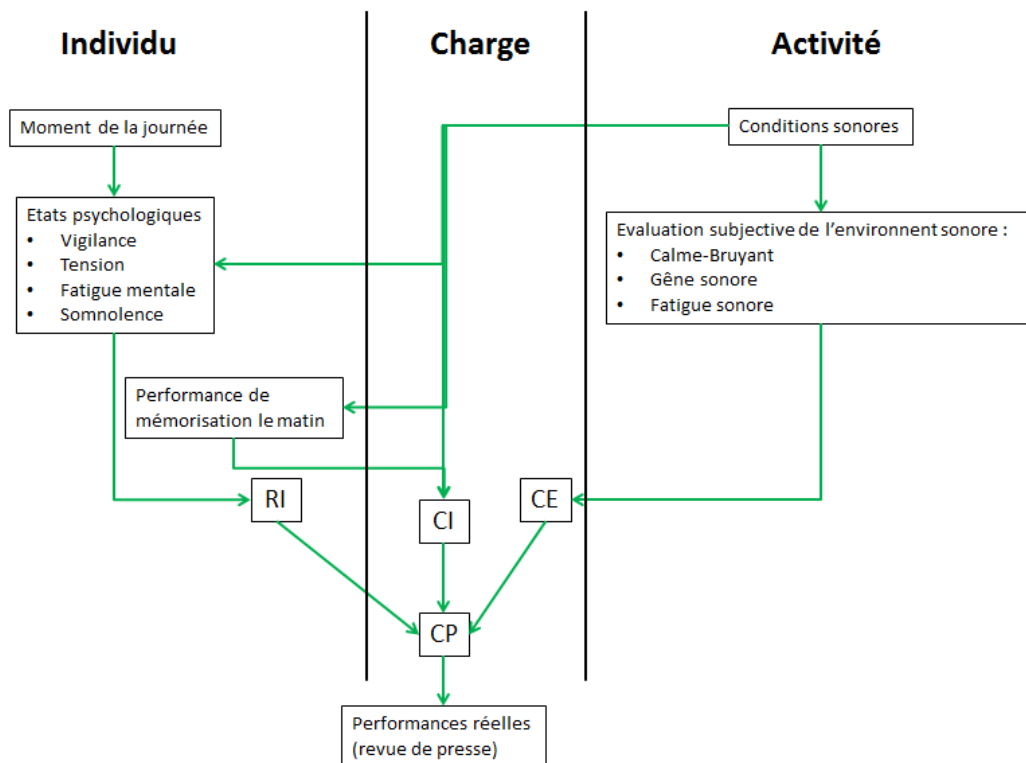


Figure 4.22. Schéma explicatif du modèle ICA établie pour l'expérience à partir des modèles GAM

Les flèches vertes présentées sur le schéma correspondent aux relations significatives obtenues au travers des analyses GAM.

Tout d'abord, ce modèle a été construit pour observer comment les conditions sonores affectent l'individu et si cet effet peut être à l'origine d'une charge mentale de travail plus ou moins importante. En fonction de la charge mentale de travail et de leurs capacités cognitives, les participants vont réaliser des performances plus ou moins élevées à la tâche de revue de presse.

Dans le schéma présenté ci-dessus, nous observons un effet des conditions sonores sur la totalité des mesures réalisées auprès des participants. Les analyses ont montré que les participants sont généralement plus fatigués lorsque le bruit contient de fortes modulations d'amplitude. Cet effet des modulations d'amplitude est également visible sur la charge externe expliquée de façon cohérente par la perception de l'environnement sonore.

Dans certains cas (fatigue, performances de mémorisation), la parole a un effet plus important sur les participants que les deux autres conditions. Cet effet de la parole augmente la charge intrinsèque due à la tâche. En effet, il semblerait que les participants ressentent une charge mentale plus élevée lors de la condition de parole et présentent des ressources disponibles plus faibles. Cela entraîne une

baisse de la charge essentielle expliquant la baisse des performances réelles lors de la condition de parole.

Ces résultats sont cohérents avec les études précédentes (Galy et al., 2012; Galy & Mélan, 2015). Le changement des conditions environnementales a donc un impact sur la charge mentale de travail des participants et indirectement sur les performances aux tâches réalisées.

4.4. Conclusions

Cette expérience consistait à évaluer l'impact du bruit de parole sur les participants lors d'une simulation en laboratoire d'une journée de travail en bureau ouvert. La méthodologie mise en place avait un caractère exploratoire. Les participants devaient réaliser une revue de presse tout le long de la journée dans trois conditions sonores différentes : bruit stationnaire, bruit modulé et parole intelligible. La durée d'exposition par condition sonore était de 6 heures et 45 minutes. Des évaluations des capacités de mémorisation de chaque participant ont été réalisées en début et en fin de journée. Pour suivre l'état des participants tout au long de l'expérience des mesures de la fatigue psychologique, de la perception de l'environnement sonore et de la charge mentale de travail ont été réalisées pour chaque condition sonore et plusieurs fois au cours de la journée.

Dans ce contexte, l'hypothèse principale de l'expérience consistait à observer un effet supérieur de la parole, comparativement aux autres deux types de bruit, le bruit modulé pouvant occuper une place intermédiaire entre parole et bruit stationnaire.

Les résultats ont montré que notre hypothèse est validée. En effet, nous avons montré qu'il est possible d'observer un effet de la parole sur les performances de travail et l'état psychologique des participants au travers d'une expérience de longue durée. Jusqu'à présent, dans la bibliographie, cet effet de parole n'avait été évalué qu'au travers de tâches de courte durée, principalement des tâches de sériation. Cependant, les expériences retrouvées dans la littérature scientifique ne sont pas représentatives des situations réelles de travail en bureau ouvert. En revanche, l'expérience que nous avons conduite, écologiquement plus valide que les expériences précédentes, nous permet d'aller plus loin dans la recherche des effets de la parole sur le travail des individus.

Tout d'abord les analyses ont montré que la méthodologie utilisée lors de cette expérience était correctement employée. Les résultats de la tâche de sériation confirment une diminution des performances de mémorisation dans la condition de parole par rapport aux autres conditions sonores, le matin et le soir. Cet effet délétère de la condition de parole est également observé sur les performances dans la tâche de revue de presse.

D'autre part, cet effet des conditions sonores est également présent sur les mesures subjectives. La parole semble être une condition plus difficile pour effectuer un travail que les autres conditions. Mis à part le fait que cette condition est plus gênante et fatigante (par rapport au bruit stationnaire), la parole semble entraîner rapidement une augmentation de la fatigue mentale (dès les premières heures d'exposition sonore). Cette fatigue, engendrée par un signal de parole indésirable, apporte une charge supplémentaire lors de la réalisation de la tâche de revue de presse. Ces conclusions sont vérifiées par les résultats obtenus, les participants déclarant une charge intrinsèque plus importante lors de la condition de parole.

La deuxième partie de l'hypothèse consistait à dire que cet effet de parole provenait en partie des fortes modulations d'amplitude qui caractérisent un signal de parole intelligible. Pour la tâche de sériation, comme la littérature le laissait prévoir, la modulation en amplitude du bruit ne suffit pas pour diminuer la performance. Par ailleurs, faute de temps, nous n'avons pas pu évaluer de façon très précise la performance à la tâche principale (revue de presse) : seul le nombre de mots écrits a été mesuré. Sur ce paramètre, moduler le bruit n'a également pas d'influence.

Pour les mesures subjectives, l'effet des conditions sonores apparaît sur l'évaluation perceptive de l'environnement sonore et sur la charge externe. Les participants estiment qu'un bruit contenant de fortes modulations d'amplitude (un signal de parole et un signal de bruit modulé) est plus bruyant, plus gênant, plus fatigant et qu'il représente une charge de travail plus élevée par rapport au bruit stationnaire. Ce résultat confirme la deuxième partie de notre hypothèse seulement pour les mesures subjectives. Les fortes modulations d'amplitude qui caractérisent un signal de parole sont responsables en partie de l'effet psychologique que la parole a sur les participants.

Sur le terrain (dans les bureaux ouverts), c'est bien la présence de parole qui est responsable des modulations d'amplitude qu'on peut mesurer. Ainsi, même si l'indicateur MeqA125ms ne tient pas compte des modulations fréquentielles propres à la parole, et qui semblent jouer un rôle important dans le décrétement de performance, il peut être pertinent pour caractériser l'émergence de voix dans le bruit de fond.

Ensuite, il était intéressant de regarder à quel moment de la journée les effets du bruit de parole se manifestaient. Pour répondre à cette question, des analyses ont été réalisées sur les seules mesures du matin. Ces analyses sont tout à fait en accord avec celles faites sur l'ensemble de la journée et elles nous montrent que la parole a un effet supérieur au bruit stationnaire à partir de deux heures d'exposition sonore. Clairement, les résultats de la fatigue mentale nous montrent un effet de la parole dès la deuxième série de questionnaires. La fatigue mentale augmente très rapidement après environ deux heures d'activité. Pour les deux autres conditions, cette augmentation de la fatigue n'apparaît qu'en fin de journée.

En dernier lieu, un modèle psychologique qui représente une photographie de l'activité des participants lors de cette expérience a été représenté. Le modèle ICA nous montre comment les conditions sonores affectent l'état psychologique, la charge mentale de travail et l'activité des participants. Ce modèle met en relation toutes les variables mesurées en expliquant leur variance directement ou indirectement par les conditions sonores. Les participants ressentent une charge mentale plus élevée pour effectuer la tâche lors de la condition de parole. Une part de cette charge provient également des fortes modulations d'amplitude qui caractérisent un signal de parole, et cela est montré au travers de la charge externe. L'autre part de cette charge provient du fait que c'est de la parole totalement indésirable qui vient perturber les participants lors de la revue de presse, et cela est montré par la charge intrinsèque due à la tâche. Ainsi, cette charge plus élevée lors de la condition de parole explique également une baisse des performances réelles lors de la réalisation de la tâche de revue de presse.

Finalement, cette expérience exploratoire a montré que nous pouvons évaluer les effets du bruit de parole lors d'une activité de travail complexe et dans des conditions de laboratoire plus écologiquement valides. Les résultats apportent un appui fort pour continuer à réaliser des expériences de longue durée afin d'étudier les effets du bruit de parole dans un contexte de travail en bureaux ouverts.

5. Conclusions et perspectives

Cette thèse consistait à valider l'existence d'effets psychologiques liés au bruit de parole au travers deux expériences en laboratoire. Les facteurs psychologiques y sont testés dans des conditions expérimentales où l'environnement sonore est totalement contrôlé.

La première expérience consistait à vérifier les effets de forte intelligibilité, au moyen d'une tâche de sériation. Cette expérience est dite de courte durée car l'exposition au bruit par condition sonore n'excédait pas huit minutes. Cette expérience testait un modèle proposé par Hongisto (Hongisto, 2005), qui relie sous la forme d'une sigmoïde, le STI avec un décrétement de performance pour une tâche de sériation. Selon le modèle, le décrétement de performance tend vers 0 pour des valeurs de $STI < 0,2$, augmente rapidement pour $0,2 < STI < 0,7$ et reste constant pour $STI > 0,7$. En utilisant ce modèle, la norme ISO 3382-3 définit la distance de confidentialité, comme étant la distance à partir de laquelle le STI mesuré dans un bureau ouvert est égal à 0,2, et une distance de distraction, comme étant la distance à partir de laquelle le STI mesuré dans un bureau ouvert est égal à 0,5.

Le premier objectif de l'expérience était d'enrichir les valeurs expérimentales de décrétement de performance dans des situations où il varie fortement avec l'intelligibilité afin de tester les indications de la norme ISO 3382-3 mais également dans des situations où l'intelligibilité de la parole est forte (STI supérieur à 0.7) afin de tester si le modèle est sigmoïdal ou linéaire.

Les résultats de l'expérience ne permettent pas de valider l'hypothèse d'une possible augmentation linéaire du DP avec le STI pour des fortes valeurs d'intelligibilité (hypothèse inspirée de (Schlittmeier et al., 2012)). Le fait qu'il n'y ait pas de différence entre la condition de 0,75 et 0,9 ne remet pas en cause le modèle proposé par Hongisto.

Dus à grande variabilité interindividuelle, ces résultats n'apportent pas plus de précisions pour le modèle proposé par Hongisto, ni vis-à-vis des choix des distances définies par la norme ISO 3382-3 (valeurs de TSI autour de 0,5), ni vis-à-vis du plateau concernant les fortes valeurs d'intelligibilité. En effet, malgré l'adaptation de la tâche aux capacités mnésiques des participants, nous n'avons pas pu diminuer la variabilité interindividuelle. En revanche, il existe deux groupes de participants du point de vue des performances réalisées. Il semblerait que, les participants les moins performants ont un âge moyen plus élevé que les participants les plus performants. Cette différence montre que l'âge des participants est aussi un facteur à prendre en compte pour des futures expériences.

Sur le long terme, des prochaines expériences sont nécessaires pour mieux définir les valeurs cibles des distances de confidentialité et de distraction proposée dans la norme ISO 3382-3. Cela peut être

fait seulement en étudiant d'autres caractéristiques du protocole expérimental liées à la difficulté de la tâche. Dans l'expérience présente nous avons adapté la tâche aux capacités mnésiques des participants. Or, d'autres caractéristiques comme : la durée de la phase de rétention, le type d'éléments à mémoriser (chiffres, lettres, mots ou nombre) peuvent avoir un impact sur la difficulté de la tâche de sériation. Il reste à étudier ces caractéristiques au travers de futures expériences, en les faisant varier de la même façon que nous avons varié le nombre d'éléments à mémoriser lors de notre expérience.

En revanche, comme dit tout le long de cette partie, pour les études concernant le travail en bureau ouvert, cette tâche reste très particulière. C'est pour cette raison que nous avons proposé lors de cette thèse une deuxième expérience plus écologiquement valide.

Cette deuxième expérience consistait à explorer les effets psychologiques du bruit de parole intelligible lorsque les participants sont placés dans des conditions de travail plus écologiquement valides. Les résultats de l'expérience ont montré un effet de la parole intelligible non seulement sur les performances objectives réalisées lors de la tâche de sériation et la tâche de revue de presse, mais également sur la fatigue mentale, l'évaluation subjective de l'environnement sonore et la charge mentale de travail.

Plus particulièrement, les résultats des performances de mémorisations montrent que le dispositif expérimental choisi est correct. Comme attendu, nous avons un effet perturbateur de la parole intelligible lors de la tâche de sériation. De même, l'idée de la tâche de revue de presse était pertinente car le travail réalisé était couteux d'un point de vue cognitif, comme souhaiter au départ. En revanche, la façon dont les participants réalisaient ces tâches (ils étaient libres de s'organiser et libres de naviguer sur internet) a montré ses limites à mesurer correctement leurs performances liées à la revue de presse : le nombre de mots écrits est un indicateur qui peut donner une information quantitative sur les performances mais il n'est pas pertinent pour évaluer qualitativement ces performances, en particulier compte tenu de la complexité de la tâche et des différents processus cognitifs auxquelles elle fait appel.

Par ailleurs, les mesures subjectives ont montré que l'activité constituait une charge mentale de travail relativement importante pour les participants et qui variait d'une condition sonore à l'autre. Plus précisément, les participants ressentaient une charge plus élevée lors de la condition de parole. Cela était dû à une fatigue mentale supplémentaire apportée par la parole intelligible.

De plus, les analyses statistiques ont montré que ces effets du bruit de parole apparaissent sur les mesures subjectives et sur les performances de mémorisations assez rapidement lors des mesures faites seulement le matin.

A partir de ces résultats, une deuxième expérience, dont les conditions seraient écologiquement valides, peut être envisagée. Le but de cette expérience serait d'étudier l'effet des variations d'intelligibilité de la parole (variations du STI et du MAeq125ms) sur l'ensemble des mesures faites lors de cette thèse. Nous avons observé que les premiers effets de la parole apparaissent dès le matin. De ce fait, la durée d'exposition par condition sonore pourrait être réduite à la demi-journée. Pour s'assurer d'un état psychophysiologique équivalent des participants au début de chaque condition, toutes les conditions devront être passées en matinée. Le protocole expérimental contiendrait toutes les mesures principales qui ont été utilisées et éprouvées lors de cette thèse. En revanche, quelques améliorations du protocole expérimental seraient indispensables. Ces améliorations consisteraient principalement à modifier l'évaluation des performances réelles lors de la tâche principale et d'utiliser comme conditions sonores seulement des signaux de parole.

Lors de l'expérience de longue durée de cette thèse la tâche principale était une revue de presse où le participant était libre de s'organiser et avait accès à la fois à la presse et à internet. Les participants ne se sentaient pas vraiment contraint par la tâche ou par la qualité du travail à fournir. Pour une deuxième expérience, il faudrait que cette liberté d'activité soit plus réduite et que la tâche principale soit plus contraignante en termes d'objectifs à atteindre. Cela permettrait de mieux mesurer les performances réelles au cours de la journée. En revanche, la difficulté de la tâche ne doit pas être excessive si l'on veut observer des différences en fonction des conditions sonores car les participants les moins performants présentent des performances stables quelles que soient les conditions sonores, comme nous l'avons observé dans la première expérience de cette thèse.

Dans le cadre de la prévention, cette thèse apporte des éléments nouveaux pour l'évaluation la gêne et la fatigue provenant des bruits de parole dans les bureaux ouverts. Lors de la deuxième expérience, nous avons montré qu'un signal de parole intelligible fatigue plus mentalement les participants que d'autres types de bruit. L'augmentation de cette fatigue pour la condition de parole intelligible est plus importante en fin de journée que pour les autres types de bruit.

De plus, lors de cette expérience, nous avons introduit le modèle ICA qui apporte une photographie de la charge mentale de travail et des facteurs liés à cette charge due à l'activité réalisée en laboratoire. Ce modèle est également adapté pour une utilisation lors des enquêtes en entreprise. Au travers des observations que nous pouvons faire à la fois en laboratoire et en entreprise, une comparaison des facteurs psychophysiologiques peut être effectuée. Cette comparaison indiquera si les participants de nos expériences en laboratoire ressentent une charge mentale de travail comparable à celle d'employés dans des bureaux ouverts.

Finalement, cette thèse à caractère exploratoire a montré que les effets psychologiques de la parole lors d'une situation de travail n'apparaissent pas seulement au travers de tâches de sériation. Ces effets de bruit de parole sur les participants sont également présents lorsque les participants sont soumis à des conditions écologiquement valides et réalisent des tâches plus proches de celles qui sont effectuées par les employés de bureaux ouverts. Il reste à comprendre quelle/s caractéristique/s acoustiques d'un signal de parole va/vont avoir l'impact le plus important sur le travail des participants et indirectement des employés d'un bureau ouvert pour réduire les risques psychologiques du bruit et améliorer leurs performances au cours de la journée de travail.

Bibliographie

- Achermann, P., & Borbély, A. A. (1994). Simulation of daytime vigilance by the additive interaction of a homeostatic and a circadian process. *Biological Cybernetics*, 71(2), 115-121.
- AFNOR. (2016). Acoustique – Performances acoustiques des espaces ouverts de bureaux (Vol. NF S31-199).
- Åkerstedt, T. (1995). Work hours, sleepiness and the underlying mechanisms. *Journal of Sleep Research*, 4, 15-22. doi: 10.1111/j.1365-2869.1995.tb00221.x
- Åkerstedt, T., & Folkard, S. (1995). Validation of the S and C components of the three-process model of alertness regulation. *Sleep: Journal of Sleep Research & Sleep Medicine*, 18(1), 1-6.
- Åkerstedt, T., & Gillberg, M. (1981). The circadian variation of experimentally displaced sleep. *sleep*, 4(2), 159-169.
- Åkerstedt, T., & Gillberg, M. (1990). Subjective and Objective Sleepiness in the Active Individual. *International Journal of Neuroscience*, 52(1-2), 29-37. doi: 10.3109/00207459008994241
- Amato, J.-N., Dauvier, B., Chevret, P., Kostallari, K., Parizet, E., & Galy, E. (2017). *Approche différentielle et multifactorielle de la fatigue ressentie en bureaux ouverts*. Paper presented at the Société d'Ergonomie de Langue Française
- Amstutz, S., Kündig, S., & Monn, C. (2010). *SBiB-Studie: schweizerische Befragung in Büros*.
- ANSI-S-3.5. (1997). Methods for the calculation of the speech intelligibility index.
- Aures, W. (1985). Ein Berechnungsverfahren der Rauigkeit [A procedure for calculating roughness]. *Acta Acustica united with Acustica*, 58(5), 268-281.
- Baddeley, A. (1992). Working memory. *Science*, 255(5044), 556-559.
- Banbury, S., & Berry, D. C. (1998). Disruption of office-related tasks by speech and office noise. *British Journal of Psychology*, 89(3), 499-517. doi: 10.1111/j.2044-8295.1998.tb02699.x
- Bell, R., Buchner, A., & Mund, I. (2008). Age-related differences in irrelevant-speech effects. *Psychology and aging*, 23(2), 377.

- Blessner, B. (1972). Speech perception under conditions of spectral transformation: I. Phonetic characteristics. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, 15(1), 5-41.
- Boujon, C. (2002). *L'inhibition au carrefour des neurosciences et des sciences de la cognition : Fonctionnement normal et pathologique*. Marseille: Solal.
- Boyce, P. R. (1974). Users' assessments of a landscaped office. *Journal of Architectural Research*, 3, 44-62.
- Brocolini, L., Parizet, E., & Chevret, P. (2016). Effect of masking noise on cognitive performance and annoyance in open plan offices. *Applied Acoustics*, 114, 44-55. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apacoust.2016.07.012>
- Chatillon, J., & Chevret, P. (2014). *Gêne acoustique des salariés dans le tertiaire: évaluations et solutions de prévention*. Paper presented at the 12ème Congrès Français d'Acoustique. , Poitiers.
- Chevret, P. (2015a). Projet ANSES GABO (Gêne Acoustique dans les Bureaux Ouverts) (IET, Trans.). Vandoeuvre-les-Nancy: INRS.
- Chevret, P. (2015b). Projet ANSES MEPAS (Méthode de Prévion de l'Ambiance Sonore dans les bureaux ouverts) (IET, Trans.). Vandoeuvre-les-Nancy: INRS.
- Chevret, P. (2016). Release from masking of speech intelligibility due to fluctuating ambient noise in open-plan offices. *Applied Acoustics*, 101(1), 156-167. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apacoust.2015.08.010>
- Colle, H. A., & Welsh, A. (1976). Acoustic masking in primary memory. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, 15(1), 17-31. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0022-5371\(76\)90003-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0022-5371(76)90003-7)
- Daneman, M., & Carpenter, P. A. (1980). Individual differences in working memory and reading. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, 19(4), 450-466.
- Daniel, P., & Weber, R. (1997). Psychoacoustical roughness: Implementation of an optimized model. *Acta Acustica united with Acustica*, 83(1), 113-123.
- Dubois, D., & Poitou, J. (2002). Normes catégorielles pour vingt-deux catégories sémantiques en français et dix catégories en allemand. *Cahiers du LCPE*, 5, 31-104.

- Ebissou, A. (2013). *Gêne sonore en bureaux ouverts: Impact de la présence de plusieurs voix intelligibles*. (Doctorat), INSA de Lyon, Lyon.
- Ebissou, A., Parizet, E., & Chevret, P. (2015). Use of the Speech Transmission Index for the assessment of sound annoyance in open-plan offices. *Applied Acoustics*, 88, 90-95. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apacoust.2014.07.012>
- Ellermeier, W., & Hellbruck, J. (1998). Is Level Irrelevant in 'Irrelevant Speech'? Effects of Loudness, Signal-to-Noise Ratio, and Binaural Unmasking. *Journal of Experimental Psychology. Human Perception & Performance*, 24(5), 1406-1414.
- Flower, L., & Hayes, J. R. (1981). A cognitive process theory of writing. *College composition and communication*, 32(4), 365-387.
- Folkard, S., & Monk, T. H. (1979a). Shiftwork and Performance. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 21(4), 483-492. doi: 10.1177/001872087902100410
- Folkard, S., & Monk, T. H. (1979b). Time of day and processing strategy in free recall. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 31(3), 461-475. doi: 10.1080/14640747908400739
- Folkard, S., & Monk, T. H. (1980). Circadian rhythms in human memory. *British Journal of Psychology*, 71(2), 295-307. doi: 10.1111/j.2044-8295.1980.tb01746.x
- French, N. R., & Steinberg, J. C. (1947). Factors governing the intelligibility of speech sounds. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 19(1), 90-119.
- Galy, E. (2017). Consideration of several mental workload categories: perspectives for elaboration of new ergonomic recommendations concerning shiftwork. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 1-15.
- Galy, E., Cariou, M., & Mélan, C. (2012). What is the relationship between mental workload factors and cognitive load types? *International Journal of Psychophysiology*, 83(3), 269-275. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2011.09.023>
- Galy, E., & Gaudin, C. (2014). Vigilance et tension: effet de l'organisation du travail et de la perception de la situation de travail. *Le Travail Humain*, 77(4), 301-323.

- Galy, E., & Mélan, C. (2015). Effects of Cognitive Appraisal and Mental Workload Factors on Performance in an Arithmetic Task. *Applied Psychophysiology and Biofeedback*, 40(4), 313-325. doi: 10.1007/s10484-015-9302-0
- Geoffriau, M., Brun, J., Chazot, G., & Claustrat, B. (1998). The physiology and pharmacology of melatonin in humans. *Hormone Research in Paediatrics*, 49(3-4), 136-141.
- Gisselgård, J., Petersson, K. M., & Ingvar, M. (2004). The irrelevant speech effect and working memory load. *NeuroImage*, 22(3), 1107-1116. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.neuroimage.2004.02.031>
- Guisan, A., Edwards Jr, T. C., & Hastie, T. (2002). Generalized linear and generalized additive models in studies of species distributions: setting the scene. *Ecological modelling*, 157(2-3), 89-100.
- Haka, M., Haapakangas, A., Keränen, J., Hakala, J., Keskinen, E., & Hongisto, V. (2009). Performance effects and subjective disturbance of speech in acoustically different office types – a laboratory experiment. *Indoor air*, 19(6), 454-467. doi: 10.1111/j.1600-0668.2009.00608.x
- Hart, S. G. (2006). Nasa-Task Load Index (NASA-TLX); 20 Years Later. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 50(9), 904-908. doi: 10.1177/154193120605000909
- Hart, S. G., & Staveland, L. E. (1988). Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of empirical and theoretical research. *Advances in psychology*, 52, 139-183.
- Hastie, T. J. (2017). Generalized additive models *Statistical models in S* (pp. 249-307): Routledge.
- Hongisto, V. (2005). A model predicting the effect of speech of varying intelligibility on work performance. *Indoor air*, 15(6), 458-468. doi: 10.1111/j.1600-0668.2005.00391.x
- Horne, J. A., & Ostberg, O. (1976). A self-assessment questionnaire to determine morningness-eveningness in human circadian rhythms. *International journal of chronobiology*, 4(2), 97-110.
- Houtgast, T., Steeneken, H., & Plomp, R. (1980). Predicting speech intelligibility in rooms from the modulation transfer function. I. General room acoustics. *Acta Acustica united with Acustica*, 46(1), 60-72.

- IEC-60268-16. (2011). Sound system equipment. Part 16: Objective rating of speech intelligibility by speech transmission index. In I. E. Commission (Ed.). Switzerland: International Electrotechnical Commission.
- IEC, I. (2011). 60268-16 Sound system equipment-Part 16: Objective rating of speech intelligibility by speech transmission index: IEC: IEC Press.
- ISO, B. 3382-3: 2012. *Acoustics-Measurement of room acoustic parameters Part, 3*.
- Jahncke, H., Hongisto, V., & Virjonen, P. (2013). Cognitive performance during irrelevant speech: Effects of speech intelligibility and office-task characteristics. *Applied Acoustics*, 74(3), 307-316. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apacoust.2012.08.007>
- Jahncke, H., Hygge, S., Halin, N., Green, A. M., & Dimberg, K. (2011). Open-plan office noise: Cognitive performance and restoration. *Journal of Environmental Psychology*, 31(4), 373-382. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvp.2011.07.002>
- Johnson, M. P., Duffy, J. F., Dijk, D. J., Ronda, J. M., Dyal, C. M., & Czeisler, C. A. (1992). Short-term memory, alertness and performance: a reappraisal of their relationship to body temperature. *Journal of Sleep Research*, 1(1), 24-29. doi: 10.1111/j.1365-2869.1992.tb00004.x
- Jones, D. M., & Macken, W. J. (1993). Irrelevant tones produce an irrelevant speech effect: implications for phonological coding in working memory. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 19(2), 369-381.
- Jones, D. M., Macken, W. J., & Murray, A. C. (1993). Disruption of visual short-term memory by changing-state auditory stimuli: The role of segmentation. *Memory & Cognition*, 21(3), 318-328. doi: 10.3758/bf03208264
- Jones, D. M., Madden, C., & Miles, C. (1992). Privileged Access by Irrelevant Speech to Short-term Memory: The Role of Changing State. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology Section A*, 44(4), 645-669. doi: 10.1080/14640749208401304
- Jutras, S. (1987). L'IPAH, version canadienne-française de l'Échelle de Levenson mesurant le lieu de contrôle tridimensionnel. *Canadian Journal of Behavioural Science/Revue canadienne des sciences du comportement*, 19(1), 74-85.

- Keus van de Poll, M., & Sörqvist, P. (2016). Effects of task interruption and background speech on word processed writing. *Applied Cognitive Psychology*, 30(3), 430-439.
- Kostallari, K., Parizet, E., & chevret, P. (2016, 11-15 Avril). *Indicateurs de confort acoustique dans les bureaux ouverts*. Paper presented at the CFA 2016 / VISHNO, Le Mans.
- Le Muet, Y., & Chevret, P. (2014). *Acoustique des bureaux ouverts: vers une nouvelle norme française*. Paper presented at the 12ème Congrès Français d'Acoustique. , Poitiers.
- Le Muet, Y., & Chevret, P. (2016, 11-15 Avril). *Les dessous de la norme NF S 31-199 sur les bureaux ouverts*. Paper presented at the CFA 2016 / VISHNO, Le Mans.
- LeCompte, D. C., Neely, C. B., & Wilson, J. R. (1997). Irrelevant speech and irrelevant tones: The relative importance of speech to the irrelevant speech effect. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 23(2), 472-483. doi: 10.1037/0278-7393.23.2.472
- Liebl, A., Assfalg, A., & Schlittmeier, S. J. (2016). The effects of speech intelligibility and temporal-spectral variability on performance and annoyance ratings. *Applied Acoustics*, 110, 170-175.
- Little, J. S., Martin, F. H., & Thomson, R. H. S. (2010). Speech versus non-speech as irrelevant sound: Controlling acoustic variation. *Biological Psychology*, 85(1), 62-70. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biopsycho.2010.05.004>
- Lorenzetti, R., & Natale, V. (1996). Time of day and processing strategies in narrative comprehension. *British Journal of Psychology*, 87(2), 209-221. doi: 10.1111/j.2044-8295.1996.tb02586.x
- Lund, S. P., Kristiansen, J., Persson, R., Shibuya, H., Toftum, J., & Clausen, G. (2012). *Cognitive test performance following exposure to noise in an open-office simulation study*. Paper presented at the Joint Baltic-Nordic Acoustics Meeting 2012.
- Mackie, R. (2013). *Vigilance: Theory, operational performance, and physiological correlates* (Vol. 3): Springer Science & Business Media.
- Mackworth, N. (1956). Vigilance. *Nature*, 178, 1375-1377.
- Meijer, W. A., De Groot, R. H., Van Boxtel, M. P., Van Gerven, P. W., & Jolles, J. (2006). Verbal learning and aging: Combined effects of irrelevant speech, interstimulus interval, and

- education. *The Journals of Gerontology Series B: Psychological Sciences and Social Sciences*, 61(5), P285-P294.
- Mélan, C., Galy, E., & Cariou, M. (2007). Mnemonic processing in air traffic controllers: effects of task parameters and work organization. *The International Journal of Aviation Psychology*, 17(4), 391-409.
- Meulemans, T. (2008). La batterie GREFEX. *Fonctions exécutives et pathologies neurologiques et psychiatriques*. Marseille: Solal, 217-252.
- Monk, T. H., Moline, M. L., Fookson, J. E., & Peetz, S. M. (1989). Circadian Determinants of Subjective Alertness. *Journal of Biological Rhythms*, 4(4), 393-404. doi: 10.1177/074873048900400401
- Orsini, A., Grossi, D., Capitani, E., Laiacona, M., Papagno, C., & Vallar, G. (1987). Verbal and spatial immediate memory span: normative data from 1355 adults and 1112 children. *The Italian Journal of Neurological Sciences*, 8(6), 537-548.
- Perrin Jegen, N., & Chevret, P. (2016). Effect of noise on comfort in open-plan offices: application of an assessment questionnaire. *Ergonomics*, 1-12. doi: 10.1080/00140139.2016.1172737
- Pierrette, M., Parizet, E., Chevret, P., & Chatillon, J. (2015). Noise effect on comfort in open-space offices: development of an assessment questionnaire. *Ergonomics*, 58(1), 96-106.
- Rhebergen, K. S., & Versfeld, N. J. (2005). A speech intelligibility index-based approach to predict the speech reception threshold for sentences in fluctuating noise for normal-hearing listeners. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 117(4), 2181-2192.
- Rosenbaum, D. A., Cohen, R. G., Jax, S. A., Weiss, D. J., & Van Der Wel, R. (2007). The problem of serial order in behavior: Lashley's legacy. *Human movement science*, 26(4), 525-554.
- 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. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0022-5371\(82\)90521-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0022-5371(82)90521-7)
- Salamé, P., & Baddeley, A. (1989). Effects of background music on phonological short-term memory. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology Section A*, 41(1), 107-122. doi: 10.1080/14640748908402355

- Schlittmeier, S., Hellbrück, J., Thaden, R., & Vorländer, M. (2008). The impact of background speech varying in intelligibility: Effects on cognitive performance and perceived disturbance. *Ergonomics*, 51(5), 719-736.
- Schlittmeier, S. J., Hellbrück, J., Thaden, R., & Vorländer, M. (2008). The impact of background speech varying in intelligibility: Effects on cognitive performance and perceived disturbance. *Ergonomics*, 51(5), 719-736. doi: 10.1080/00140130701745925
- Schlittmeier, S. J., Weissgerber, T., Kerber, S., Fastl, H., & Hellbrück, J. (2012). Algorithmic modeling of the irrelevant sound effect (ISE) by the hearing sensation fluctuation strength. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 74(1), 194-203. doi: 10.3758/s13414-011-0230-7
- Schroeder, M. (1968). Reference signal for signal quality studies. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 44(6), 1735-1736.
- Scott, S. K., Rosen, S., Beaman, C. P., Davis, J. P., & Wise, R. J. (2009). The neural processing of masked speech: evidence for different mechanisms in the left and right temporal lobes. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 125(3), 1737-1743.
- Smets, E., Garssen, B., Bonke, B. d., & De Haes, J. (1995). The Multidimensional Fatigue Inventory (MFI) psychometric qualities of an instrument to assess fatigue. *Journal of Psychosomatic Research*, 39(3), 315-325.
- Smets, E. M., Garssen, B., Cull, A., & de Haes, J. C. (1996). Application of the multidimensional fatigue inventory (MFI-20) in cancer patients receiving radiotherapy. *British Journal of Cancer*, 73(2), 241-245.
- Smets, E. M. A., Garssen, B., Bonke, B., & De Haes, J. C. J. M. (1995). The multidimensional Fatigue Inventory (MFI) psychometric qualities of an instrument to assess fatigue. *Journal of Psychosomatic Research*, 39(3), 315-325. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/0022-3999\(94\)00125-O](http://dx.doi.org/10.1016/0022-3999(94)00125-O)
- Sörqvist, P., Nöstl, A., & Halin, N. (2012). Disruption of writing processes by the semanticity of background speech. *Scandinavian Journal of Psychology*, 53(2), 97-102.
- Steeneken, H. J., & Houtgast, T. (2002). Validation of the revised STIr method. *Speech Communication*, 38(3-4), 413-425.

- Steeneken, H. J. M., & Houtgast, T. (1980). A physical method for measuring speech-transmission quality. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 67(1), 318-326. doi: <http://dx.doi.org/10.1121/1.384464>
- Stroop, J. R. (1935). Studies of interference in serial verbal reactions. *Journal of experimental psychology*, 18(6), 643.
- Sundstrom, E., Town, J. P., Rice, R. W., Osborn, D. P., & Brill, M. (1994). Office Noise, Satisfaction, and Performance. *Environment and Behavior*, 26(2), 195-222. doi: 10.1177/001391659402600204
- Thayer, R. E. (1978). Factor Analytic and Reliability Studies on the Activation-Deactivation Adjective Check List. *Psychological Reports*, 42(3), 747-756. doi: 10.2466/pr0.1978.42.3.747
- Thayer, R. E. (1986). Activation-deactivation adjective check list: current overview and structural analysis. *Psychological Reports*, 58(2), 607-614. doi: 10.2466/pr0.1986.58.2.607
- Thayer, R. E. (1986). Activation-deactivation adjective check list: Current overview and structural analysis. *Psychological reports*, 58(2), 607-614.
- Thayer, R. E. (1987). Problem perception, optimism, and related states as a function of time of day (diurnal rhythm) and moderate exercise: Two arousal systems in interaction. *Motivation and Emotion*, 11(1), 19-36. doi: 10.1007/bf00992211
- van de Poll, M. K., Ljung, R., Odelius, J., & Sörqvist, P. (2014). Disruption of writing by background speech: The role of speech transmission index. *Applied Acoustics*, 81, 15-18.
- Varjo, J., Hongisto, V., Haapakangas, A., Maula, H., Koskela, H., & Hyönä, J. (2015). Simultaneous effects of irrelevant speech, temperature and ventilation rate on performance and satisfaction in open-plan offices. *Journal of Environmental Psychology*, 44, 16-33. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvp.2015.08.001>
- Virjonen, P., Keränen, J., & Hongisto, V. (2009). Determination of Acoustical Conditions in Open-Plan Offices: Proposal for New Measurement Method and Target Values. *Acta Acustica united with Acustica*, 95(2), 279-290. doi: 10.3813/aaa.918150
- Wechsler, D. (2010). *WAIS-IV: échelle d'intelligence de Wechsler pour adultes*.

Wilde, N. J., Strauss, E., & Tulskey, D. S. (2004). Memory span on the Wechsler scales. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*, 26(4), 539-549.

Zimmer, K., Ghani, J., & Ellermeier, W. (2008). The role of task interference and exposure duration in judging noise annoyance. *Journal of sound and vibration*, 311(3–5), 1039-1051. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jsv.2007.10.002>

Zwicker, E., & Fastl, H. (2013). *Psychoacoustics: Facts and models* (Vol. 22): Springer Science & Business Media.

ANNEXE A : Consignes et informations de l'expérience de longue durée

CONSIGNES DE LA TÂCHE DE MEMOIRE

(à ne pas distribuer aux participants)

9H00 – 9H05

TÂCHE D'HABITUATION

Dire aux participants de :

1. Cliquer sur le raccourci « HABITUATION.exe »
2. Entrer votre nom, prénom, votre numéro de poste [chiffre à gauche sur votre bureau] et valider.
3. Consignes de la tâche :

« Vous allez voir des chiffres de 1 à 9 apparaître, un par un, au centre de l'écran, mémorisez-les, ils ne vous seront présentés qu'une seule fois. »

Ensuite, apparaitront au centre de l'écran, des chiffres sur pavé numérique. Vous devez cliquer sur le maximum de chiffres dont vous vous souvenez, dans l'ordre où ils sont apparus.

Exemples de réponse :

« 1 2 3 4 » Vous répondez « 1 2 3 4 », tout est correct.

« 1 2 3 4 » Vous répondez « 1 2 3 » (seulement), vous avez fait un oubli (le 4).

« 1 2 3 4 » Vous répondez « 1 3 2 4 », vous avez deux réponses correctes : 1 et 4, et deux erreurs.

« 1 2 3 4 » Vous répondez « 1 2 4 » (seulement), vous avez deux réponses correctes : 1 et 2, une erreur et un oubli.

Nous allons commencer par quelques essais avant l'expérience proprement dite. Essayez de retenir et, de restituer un maximum de chiffres dans le bon ordre.

4. Vous pouvez cliquer sur « commencer ».

9H05 – 9H15

TÂCHE DE MEMOIRE

Dire aux participants de :

1. Cliquer sur le raccourci « MEMOIRE.exe »
2. Entrer votre nom, prénom, votre numéro de poste [chiffre à gauche sur votre bureau] et valider.
3. Comme pour l'exercice précédent. Vous devez cliquer sur le maximum de chiffres dont vous vous souvenez, dans l'ordre où ils sont apparus.

Cet exercice sera répété pendant une dizaine de minutes.

Lorsque vous aurez terminé, attendez à votre place, dans le silence (sans parler).

16H40 – 16H50

L'expérimentateur s'assure que tous les questionnaires de 16H30 sont complétés.

Ensuite, il prend la parole en couvrant le fond sonore.

Son discours :

1. Maintenant, vous enregistrez et fermez vos documents Word et Excel, vous cliquez sur le raccourci « MEMOIRE.exe »
2. Vous entrez votre nom, prénom, votre numéro de poste [chiffre à gauche sur votre bureau] et vous validez.
3. Comme ce matin, vous devez cliquer sur le maximum de chiffres dont vous vous souvenez, dans l'ordre où ils sont apparus.

Cet exercice sera répété pendant une dizaine de minutes.

Lorsque vous aurez terminé, attendez à votre place, dans le silence (sans parler).

CONSIGNES POUR LE REMPLISSAGE DES QUESTIONNAIRES

Tout au long de la journée, vous devrez interrompre votre activité pour remplir des questionnaires informatiques.

Essayez de répondre le plus honnêtement et le plus rapidement possible aux questions qui reviendront régulièrement au cours de la journée.

Pour vous aider, nous vous avons distribué une fiche « informations personnelles » avec votre numéro d'identifiant. Vous y retrouverez les heures auxquelles vous devrez compléter chacun des questionnaires. À chaque questionnaire complété, vous n'aurez qu'à cocher la case correspondante.

Le moment de remplir ces questionnaires sera annoncé par des fenêtres « rappel » qui apparaîtront sur l'écran de votre ordinateur.

Il est important que vous complétiez chacun des questionnaires. Nous vérifierons et si vous en oubliez, nous vous enverrons un message par e-mail, précisant les questionnaires que vous avez oublié de compléter. Dans ce cas, vous devrez arrêter votre activité et rapidement compléter les questionnaires que vous avez omis.



Pour retrouver les questionnaires, allez sur Internet Explorer :

Consignes supplémentaires :

1. Vous ne pouvez pas sortir de la salle. Les pauses sont à l'initiative de l'expérimentateur.
2. Vous n'avez pas le droit de communiquer oralement avec les autres personnes dans la salle avec vous.

3. Si vous avez des questions au cours de cette journée, envoyez-les par mail en

répondant à « contacter l'expérimentateur », dans Lotus :



4. En dernier recours, vous pouvez également lever la main pour appeler l'expérimentateur.

ACTIVITE DE REVUE DE PRESSE

Imaginez que vous devez faire une revue de presse pour votre supérieur(e) qui a prochainement une réunion très importante et qui doit impérativement avoir une connaissance exhaustive de l'actualité.

Pour cela, vous disposez de 4 journaux différents. À partir de ces journaux, vous devrez mener deux activités distinctes, à votre guise, durant toute la journée. Il n'est pas nécessaire d'avoir terminé une activité avant d'entamer l'autre. Vous êtes donc libres de vous organiser.

ACTIVITE 1 : IDENTIFICATION DES THEMES

Tâche : Identifier l'ensemble des thèmes abordés dans les journaux.

À la fin de la journée, vous devrez avoir renseigné dans le document Excel nommé « Tableau-Thèmes.xlsx », l'ensemble des thèmes que vous avez identifiés. Vous pouvez ouvrir ce document en cliquant sur le raccourci « REVUE DE PRESSE » sur votre Bureau d'Ordinateur.

Lorsque vous commencerez à compléter votre tableau, n'oubliez pas de reporter votre identifiant.



Le remplissage du tableau Excel se fait en mettant des croix dans les cases où le thème est traité par un ou plusieurs journaux, comme ci-dessous.

C'est vous qui définissez le thème. Dans cet exemple, le participant a trouvé le thème Blabla1 dans le journal Libération et dans l'Est Républicain. Il a trouvé le thème Blabla3 dans tous les journaux.

	Thème 1	Thème 2	Thème 3	Thème 4	Thème 5	Thème 6
Nom du thème	Blabla1	Blabla2	Blabla3	Blabla4	Blabla5	Blabla6
Libération	X		X		X	
La Croix		X	X	X	X	
L'Est Républicain	X	X	X		X	X
Nice matin			X			X

Pour les noms des thèmes, vous pouvez reprendre les titres des journaux, ou choisir un ou des mots clés qui, pour vous, représentent le mieux ce thème. Par exemple : « élection présidentielle », « politique internationale » ...

ACTIVITE 2 : SYNTHESE DES THEMES

Tâche : Réaliser des synthèses pour le maximum de thèmes que vous avez identifiés. Pour faire une synthèse, vous devez croiser les informations des journaux.

À la fin de la journée, vous devrez avoir écrit vos synthèses dans le document « Document_Synthèse.docx » qui peut être ouvert en cliquant sur le raccourci REVUE DE PRESSE de votre Bureau d'Ordinateur.

Lorsque vous commencerez à compléter votre document, n'oubliez pas de reporter votre identifiant.



La synthèse de chacun des thèmes répertoriés doit faire minimum 250 mots et au maximum 1 page.

Vous pouvez vous organiser comme vous le souhaitez, mais à la fin de la journée votre tableau Excel et votre document Word doivent être aussi exhaustifs et complets que possible.

Nous évaluerons votre travail en tenant compte du remplissage du tableau et de la qualité de vos synthèses. L'orthographe et la syntaxe font également partie de cette évaluation.

Vous ne devez pas écrire sur les journaux, des feuilles de brouillon sont à votre disposition.

IMPORTANT :

- a) Pensez à enregistrer régulièrement vos documents !
- b) Vous ne pouvez pas sortir de la salle. Les pauses sont à l'initiative de l'expérimentateur.
- c) Vous n'avez pas le droit de communiquer oralement avec les autres personnes dans la salle avec vous.
- d) Si vous avez des questions au cours de cette journée, envoyez-les par mail en répondant à



« contacter l'expérimentateur », dans Lotus :

En dernier recours, vous pouvez également lever la main pour appeler l'expérimentateur.

- e) Vous ne devez pas écrire sur les journaux.
- f) Vous pouvez utiliser votre téléphone portable, mais seulement en mode silence (sans vibreur).

Vous n'êtes autorisés à passer des appels que pendant les pauses.

- g) Les ordinateurs mis à votre disposition sont reliés à Internet, vous pouvez « surfer » sur internet ou/et consulter vos e-mails personnels, ou/et votre compte FaceBook ...

Cependant nous vous informons que nous enregistrons l'ensemble de vos activités sur vos PC. Nous n'irons pas lire vos communications et échanges personnels.

- h) Cafés et cigarettes ne sont autorisés que pendant les pauses.

FORMULAIRE DE CONSENTEMENT LIBRE ET ÉCLAIRÉ POUR LA PARTICIPATION À UNE RECHERCHE

Titre de la recherche : Calcul d'indicateurs d'exposition aux bruits de parole dans le tertiaire

Je soussigné(e)
(Madame, Monsieur) (Nom Prénom), (Date de naissance)

consens librement et volontairement à participer à l'étude qui m'a été proposée.

Je certifie avoir pris connaissance de la lettre d'information relative à cette recherche.

J'ai pu bénéficier d'un temps de réflexion suffisant pour prendre ma décision.

J'accepte que mes données personnelles (nom, sexe et âge) puissent être accessibles au responsable de la recherche (Monsieur Patrick Chevret (INRS) ou son remplaçant). A l'exception de cette personne, qui traitera les informations dans le plus strict respect de confidentialité, mon anonymat sera préservé.

J'accepte que les données recueillies à l'occasion de cette étude puissent être conservées dans une base de données et faire l'objet d'un traitement automatisé par les organisateurs de la recherche. J'ai bien noté que, conformément à la loi "Informatique et Liberté" du 6 janvier 1978, je pourrai exercer mon droit d'accès, de rectification et d'opposition au traitement de ces données à tout moment par l'intermédiaire de Monsieur Patrick Chevret (INRS) ou son remplaçant.

Mon consentement ne décharge pas les organisateurs de la recherche de leurs responsabilités et je conserve tous mes droits garantis par la loi.

Je suis libre d'accepter ou de refuser de participer, et je suis libre d'interrompre ma participation à la présente étude à tout moment, sans avoir à motiver mon choix ni encourir aucune responsabilité ni aucun préjudice.

J'ai reçu un exemplaire signé de ce consentement.

Fait à Vandœuvre-lès-Nancy

Le

Nom et signature de l'investigateur*

Signature du participant*

**** Signature précédée de la mention manuscrite « Lu et approuvé »***

LETTRE D'INFORMATION DESTINÉE AUX PERSONNES VOLONTAIRES POUR LA PARTICIPATION À UNE RECHERCHE

Madame, Monsieur,

Nous vous proposons de participer à un programme de recherche sur les conditions de travail en open-space. En collaboration avec le Laboratoire de Vibrations et Acoustique de l'INSA de Lyon et le laboratoire LAPCOS de l'université de Nice, l'INRS a mis au point des tests en laboratoire qui consistent à placer des sujets pendant une journée dans des conditions de travail proches de celles que l'on trouve dans les open-spaces.

Avant de prendre votre décision sur votre participation à cette recherche, il est important que vous compreniez quel est l'intérêt de cette étude, quels sont les bénéfices attendus, quels sont les contraintes et les risques éventuels, ainsi que les modalités de déroulement de celle-ci.

Prenez votre temps pour lire et comprendre cette lettre d'information destinée à répondre aux questions que vous pourriez vous poser au sujet de cette étude, et si vous le souhaitez, vous pouvez également vous adresser au responsable de l'étude et lui poser toutes vos questions.

1. Bénéfices attendus

Les bénéfices attendus pour la recherche sont de faire progresser les connaissances sur les conditions de travail des salariés en open-space, afin d'améliorer les mesures de préventions à destination de cette population. A terme, il s'agit de construire des méthodes de diagnostic acoustique et d'aménagement des locaux de travail.

2. Déroulement de l'étude

Pour évaluer les effets des conditions de travail en open-space, vous aurez à réaliser pendant une journée complète, un ensemble de tâches de recherche d'informations, de classification et de synthèse à partir d'articles de presse. L'expérimentation se déroulera sur trois journées (non consécutives). A plusieurs reprises au cours de la journée, il vous sera demandé de remplir des questionnaires sur vos impressions.

Préalablement aux tests proprement dits, il vous sera aussi demandé une disponibilité de 2 heures supplémentaires afin de réaliser des tests d'audiométrie.

La durée estimée de l'ensemble de ces tests est de 8 heures par jour plus les pauses, répartis sur trois jours non consécutifs, auxquelles s'ajoutent deux heures supplémentaires (non incluses dans ces 3 jours) pour les tests d'audiométrie.

3. Contraintes et risques éventuels

L'expérience à laquelle vous participerez ne présente aucun risque pour la santé.

5. Votre participation à cette recherche est entièrement libre et volontaire

Vous êtes libre d'accepter ou de refuser de participer à l'étude qui vous est proposée. Vous bénéficiez du temps de réflexion nécessaire à la prise de votre décision concernant votre participation à cette recherche.

6. Modalités d'un arrêt ou d'une sortie d'étude ou d'interruption

En cas d'acceptation, vous êtes libre de changer d'avis en cours d'étude et d'interrompre à tout moment votre participation, sans motiver votre choix, ni encourir de responsabilités.

Si vous décidez d'interrompre votre participation à la présente étude et sous réserve que vous donniez votre accord, vos données seront conservées pour l'analyse des résultats globaux. Si, au contraire, vous décidez de retirer votre consentement, vos données seront détruites.

7. Confidentialité

Vos données personnelles (nom, sexe et âge) recueillies à l'occasion de cette étude resteront confidentielles et ne pourront être consultées que par le responsable INRS de la recherche (Monsieur Patrick Chevret ou ses assistants).

Les résultats de cette recherche peuvent être utilisés dans les rapports et publications scientifiques, cependant vos données personnelles ne seront aucunement identifiables et votre anonymat sera entièrement respecté.

8. Assurance Responsabilité Civile

L'INRS a contracté une assurance responsabilité civile pour couvrir les risques liés à cette recherche.

9. Indemnités

Nous vous informons qu'une indemnité forfaitaire vous sera versée pour la participation à cette recherche, en compensation des contraintes subies, sur la base de 90 € pour une journée (ou 8 heures)

Il est enfin rappelé que la présente indemnité est fixée, en compensation des contraintes et sujétions subies, au regard des charges et sujétions matérielles qui lui ont été imposées et ne constitue en conséquence ni une rémunération pour un travail, ni une compensation pour un risque encouru.

10. Informations complémentaires

Si vous avez des questions pendant votre participation à cette étude, vous pourrez contacter le responsable de l'étude, Monsieur Patrick Chevret ou ses assistants.

Lorsque vous aurez lu cette lettre d'information et obtenu les réponses aux questions que vous vous posez en interrogeant le responsable de l'étude ou ses assistants, il vous sera proposé de donner votre consentement libre et éclairé par écrit en signant le formulaire de consentement ci-joint.

ANNEXE B: Résultats supplémentaires pour l'expérience de longue durée

Questionnaire GABO

L'évaluation de l'environnement de travail est faite au travers le questionnaire GABO (Gêne Acoustique dans les Bureaux Ouverts). Lors de cette expérience seulement 14 questions ont été utilisé pour définir un score de satisfaction globale sur l'environnement de travail. Le score varie entre 1 et 5. Selon les recommandations de la norme française NF S31-199 lorsque le score est inférieur à 2,5 la satisfaction globale est faible, lorsque le score se retrouve entre 2,5 et 3,5 la satisfaction globale est moyenne et lorsqu'il est supérieur à 3,5 la satisfaction globale est importante. Sur la Figure 0.1 est donné la répartition des scores de la satisfaction globale selon les recommandations de la norme (bleu correspond à « faible », rouge à « moyenne » et vert à « importante »).

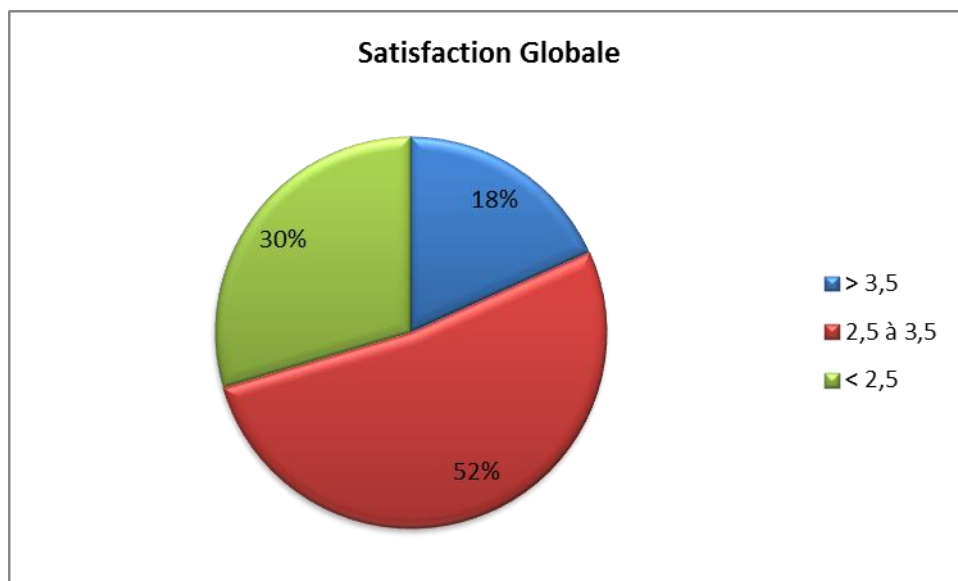


Figure 0.1. Répartition des données du score de la satisfaction globale pour toutes les conditions sonores.

18 % des participants estiment une satisfaction globale faible, pour 52 % des participants la satisfaction globale est moyenne et 30 % des participants l'estiment importante. La valeur moyenne de cette satisfaction est de 2,9 (moyenne). Ce score est le même que celui mesuré lors des enquêtes conduites par (Pierrette et al., 2015).

Sur la Figure 0.2 sont représentées le score moyen de satisfaction globale en fonction des conditions sonores, accompagnées de l'intervalle de confiance à 95%.

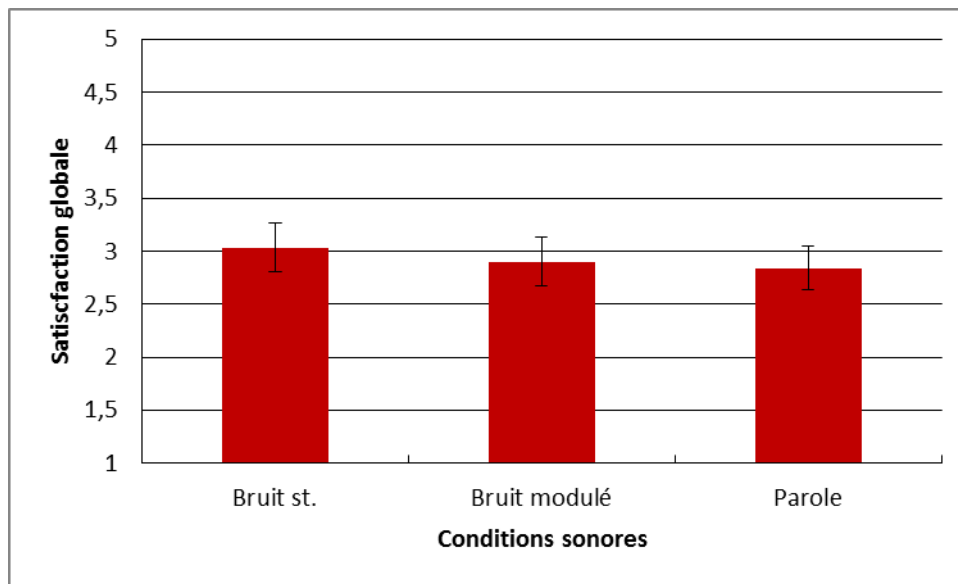


Figure 0.2. Score moyen de satisfaction globale et intervalle de confiance à 95 % en fonction des conditions sonores

Sur cette figure, on note une baisse de satisfaction globale en partant de la condition du bruit stationnaire vers la condition de parole. Cependant, une RM-ANOVA à un facteur ne montre pas d'effet significatif des conditions sonores sur la satisfaction globale ($F(2)=2,57$ $p=0,0832$). Malgré cela, la valeur de p de cette analyse est proche du seuil de significativité (pour $p<0,05$ l'effet est considéré comme significatif), ce qui peut inciter à faire des analyses sur les sous-dimensions de la satisfaction globale que sont le confort et la privacité.

Sur la Figure 0.3 sont représentés les scores de confort et de privacité en fonction des conditions sonores. Pour le confort, les trois valeurs sont aux alentours de 3,5 ce qui se traduit comme un confort moyen de l'environnement de travail. On retrouve cette valeur moyenne également sur les enquêtes menées par (Pierrette et al., 2015). Dans ce graphique il y a des différences légères entre les trois conditions sonores mais elles ne sont pas significatives ($F(2)=0,49$ $p=0,6136$).

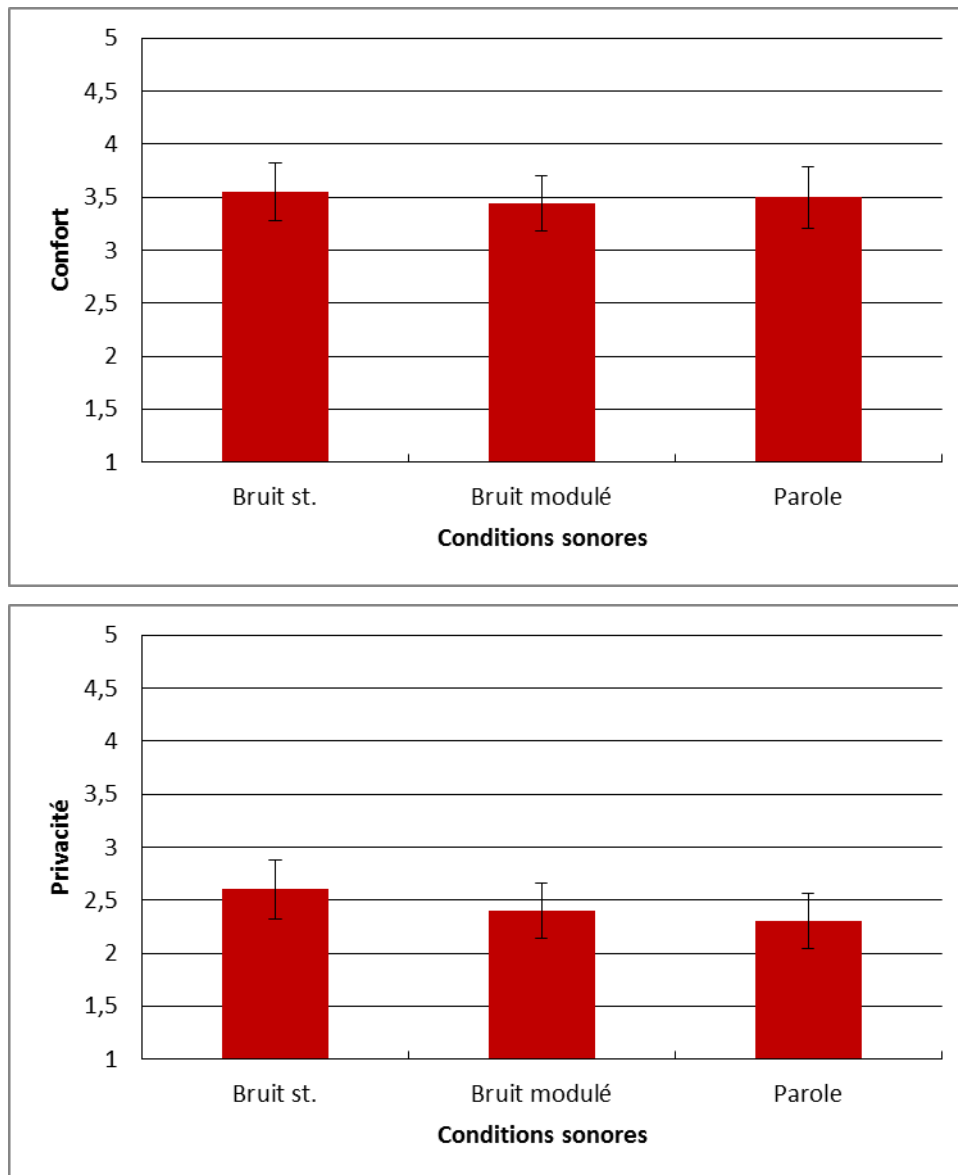


Figure 0.3. Scores moyens de confort (haut) et de privacité (bas) et intervalle de confiance à 95 %

Par ailleurs, le score moyen de privacité baisse de 2,6 pour la condition de bruit stationnaire à 2,28 pour la condition de parole. La valeur moyenne pour les trois conditions confondues est de 2,43, valeur proche de 2,5 obtenue par (Pierrette et al., 2015). Une RM-ANOVA montre un effet significatif des conditions sonores sur la privacité ($F(2) = 4,04$ $p=0.0217$). Le test post-hoc de Tukey montre une différence entre la condition de parole et la condition du bruit stationnaire (Tableau 6). En revanche, il n'y a pas de différence significative entre le bruit modulé et les deux autres conditions. Lorsqu'on regarde plus en détail les items de cette sous-dimension, il n'y en a que deux parmi les sept, qui sont impactées par les conditions sonores : la satisfaction due à l'ambiance sonore et la concentration. Les résultats de la satisfaction due à l'ambiance sonore sont globalement les mêmes que les résultats de

la privacité : les participants sont faiblement satisfait de l'ambiance sonore (valeur moyenne de 2,26) et il y a un effet significatif des conditions sonores ($F(2)=3,92$ $p=0,024$) dû à une différence significative entre la condition de bruit stationnaire et la condition de parole (cf. Tableau 6 sur les résultats du test post-hoc de Tukey). Sur la Figure 0.4 sont représentées les valeurs moyennes accompagnées de leur intervalle de confiance à 95 % du score de concentration. On remarque que la forme de l'allure est la même que celle de la privacité.

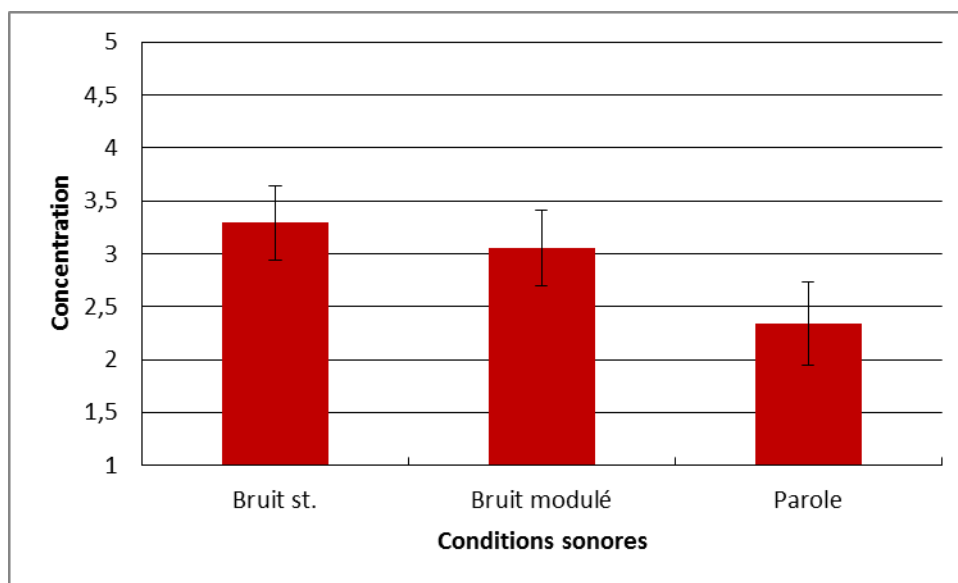


Figure 0.4. Moyennes accompagnées des intervalles de confiance à 95 % du score de concentration en fonction des conditions sonores

Une RM-ANOVA montre un fort effet significatif des conditions sonores sur la concentration ($F(2)=16,21$ $p=0,000$). Cet effet est dû à une différence significative entre la condition de parole et les deux autres conditions. Il n'y a pas de différence significative entre le bruit stationnaire et le bruit modulé (cf. tableau 7 sur les résultats du test post-hoc de Tukey). En passant du bruit stationnaire à la condition de parole le score baisse de 3,29 à 2,34. Lorsque les participants sont soumis aux bruits stationnaire et modulé la concentration est moyenne (environ 3) et lorsqu'ils soumiennent aux bruits de parole la concentration est faible (entre 2 et 2,5).

	Privacité	Ambiance sonore	Concentration
Bruit stationnaire	A	A	A
Bruit modulé	AB	AB	A
Parole	B	B	B

Tableau 6. Résultats du test post-hoc de Tukey pour les scores de privacité et de concentration.

Finalement, ces résultats montrent une cohérence entre les enquêtes du terrain menées par (Pierrette et al., 2015) et cette étude en laboratoire dont le but est de simuler une situation de travail en bureau ouvert. Comme dans l'étude de Pierrette et al., il y a une différence significative entre la privacité et le confort ($z(114)=9,8062$ $p=0,0000$). De plus, le questionnaire GABO montre que lorsque les participants subissent un bruit de parole intelligible, le niveau de concentration baisse significativement par rapport au niveau de concentration lors d'un bruit stationnaire ou modulé.

Questionnaire de Thayer et somnolence

La deuxième mesure concernant l'état de l'individu est celle de la tension et de la vigilance faite au travers du questionnaire de Thayer. Sur la Figure 0.5, sont présentées les valeurs moyennes accompagnées des intervalles de confiance à 95 % de la tension (en haut) et de la vigilance (en bas) en fonction du moment de la journée. Les courbes de différentes couleurs correspondent aux conditions sonores, comme précédemment. Les deux indicateurs varient entre 0 et 4. Plus le score est élevé, plus les participants sont respectivement en tension et vigilants. Globalement le score de la tension se trouve en bas de l'échelle d'évaluation alors que le score de la vigilance se trouve au milieu de cette échelle, ce qui indique que les participants sont plutôt détendus et moyennement vigilants en cours d'expérience.

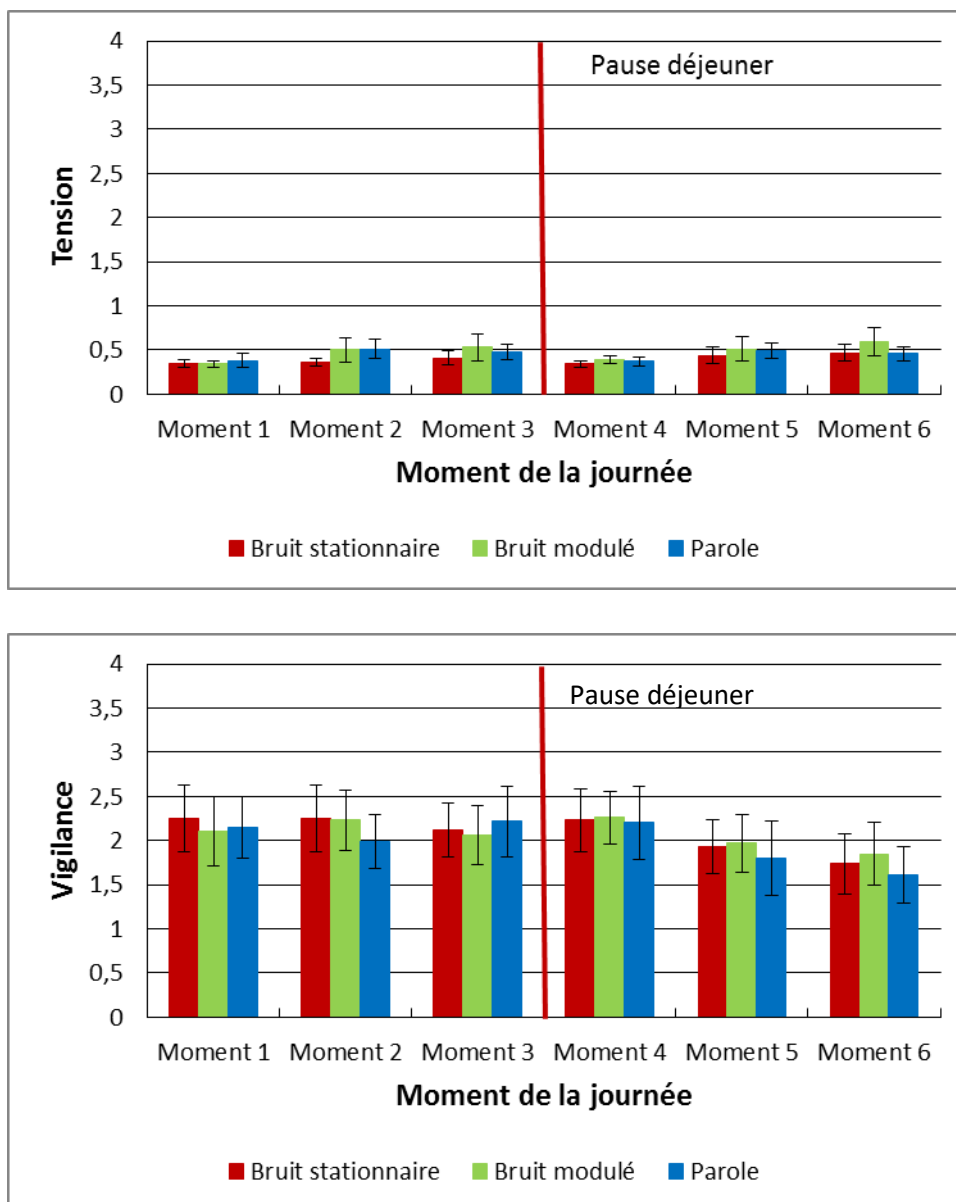


Figure 0.5. Tension (haut) et vigilance (bas) en fonction du moment de la journée, pour chaque condition sonore.

Une RM-ANOVA à deux facteurs montre un effet significatif du moment de la journée sur les deux indicateurs. D'après le tableau 8 du test post-hoc de Tukey, l'effet significatif sur la tension ($F(5) = 7,17$ $p < 0,0001$) provient d'une différence entre les moments 2, 3, 5, 6 et les moments 1, 4. Les moments 1 et 4 correspondent respectivement au début de la matinée et au début de l'après-midi. Pour la vigilance, cet effet significatif ($F(5) = 3,81$ $p = 0,0026$) provient d'une baisse de vigilance en fin de journée (cf. tableau 8).

Sur la mesure de la tension, il y a également un effet significatif des conditions sonores ($F(2) = 3,58$ $p = 0,0330$). Le test de Tukey montre une différence entre la condition de bruit stationnaire est les

deux autres conditions. En revanche, il n'y a pas d'effet des conditions sonores sur la vigilance ($F(2) = 0,54$ $p = 0,5830$).

La mesure de la somnolence est présentée sur la Figure 0.6 qui montre les valeurs moyennes accompagnées des intervalles de confiance à 95 %. L'indicateur varie entre 0 et 100, 0 signifiant que le participant n'est pas somnolent et 100 que le participant est très somnolent. Une RM-ANOVA en fonction des deux variables ne montre aucun effet significatif.

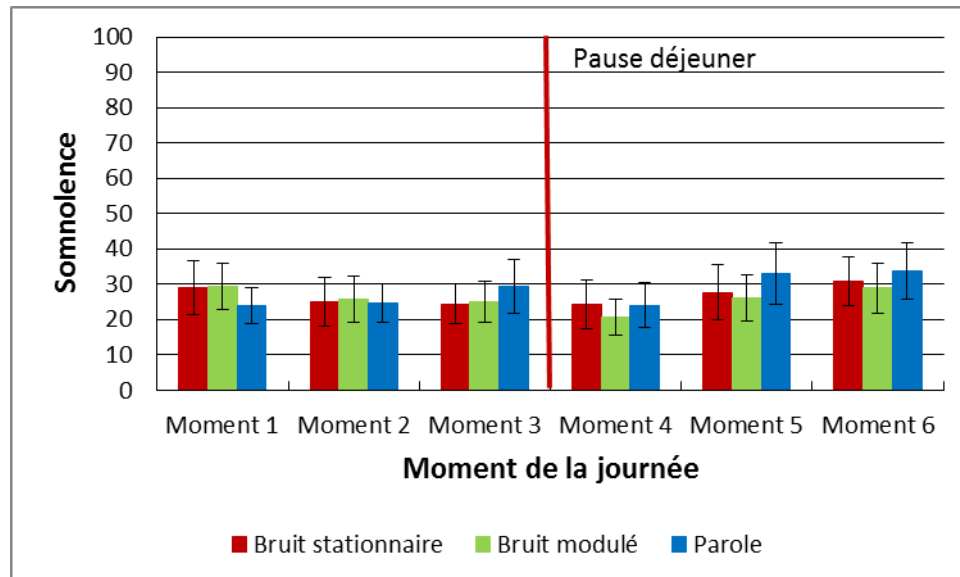


Figure 0.6. Somnolence en fonction du moment de la journée, pour chaque condition sonore.

Conditions sonores			
	Tension	Vigilance	Somnolence
Bruit stationnaire	B	Pas d'effet	Pas d'effet
Bruit modulé	A	Pas d'effet	Pas d'effet
Parole	A	Pas d'effet	Pas d'effet
Moment de la journée			
	Tension	Vigilance	Somnolence
1	B	AB	Pas d'effet
2	A	AB	Pas d'effet
3	A	AB	Pas d'effet
4	B	B	Pas d'effet
5	A	A C	Pas d'effet
6	A	C	Pas d'effet

Tableau 7. Résultats du test post-hoc de Tukey pour les variables psychologiques.

Ainsi, il existe un effet des conditions sonores sur la fatigue mentale et la tension. Cet effet n'est pas le même sur les trois indicateurs. Pour la fatigue mentale, il y a une différence significative pour toutes les conditions sonores. Pour la tension, une différence significative apparaît entre le bruit stationnaire et les bruits modulés (bruit blanc modulé et bruit de parole).

Les résultats montrent également un effet du moment de la journée sur la vigilance et la tension. En revanche, le score brut de somnolence reste constant durant la journée, alors que des variations de somnolence lors de la journée dû au rythme biologique du corps humain sont courantes selon la littérature (Achermann & Borbély, 1994; Torbjörn Åkerstedt & Gillberg, 1981). Une hypothèse pourrait être liée au fait que les participants sont enfermés dans une salle, sans être exposés à la lumière du jour – facteur qui joue dans le fonctionnement biologique du corps humain (Geoffriau, Brun, Chazot, & Claustrat, 1998). On note dans les résultats une augmentation de fatigue et une

baisse de vigilance en fin de journée. La tension quant-à-elle semble être rythmée par la pause déjeuner (BAA/pause déjeuner/BAA). Finalement dans l'ensemble, les participants sont de plus en plus affectés par les conditions de travail au fur et à mesure que la journée avance. Seule la tension semble retomber après la pause déjeuner.

Fatigue mentale – Effet du terme croisé « conditions sonores # moment de la journée »

Les résultats de RM-ANOVA montrent un effet significatif du terme croisé « conditions sonores # moment de la journée » sur la fatigue mentale ($F(10,370) = 3,13$ $p < 0,001$). Le post-hoc de Tukey HSD est montré sur le tableau ci-dessous.

Conditions sonores # Moment de la journée	Groupes de Tukey HSD
Bruit st. # 1	A
Bruit st. # 2	A
Bruit st. # 3	A
Bruit st. # 4	A
Bruit st. # 5	ABC
Bruit st. # 6	CDE
Bruit modulé # 1	AB
Bruit modulé # 2	ABC
Bruit modulé # 3	ABC
Bruit modulé # 4	AB
Bruit modulé # 5	BCD
Bruit modulé # 6	CD
Parole # 1	A
Parole # 2	CDE
Parole # 3	CD
Parole # 4	ABC

Parole # 5	DE
Parole # 6	E

Modèles et analyses GAM supplémentaires réalisés avec R

Fatigue générale

Le modèle qui explique le pourcentage de variance de la fatigue générale le plus élevé ($R^2 = 0,0354$ variance expliquée (« deviance explained ») = 4,07 %), est le modèle prenant en considération l'interaction entre le moment de la journée et les conditions sonores ($F = 5,444$ $p < 0,0001$). Sur la figure 0.7 est représentée la relation entre la fatigue générale et l'interaction entre le moment de la journée et les conditions sonores. La couleur rouge correspond à la fatigue générale en dessous du score moyen et la couleur jaune correspond à la fatigue générale au-dessus du score moyen.

Cette figure montre que la fatigue générale augmente avec le moment de la journée et cette augmentation de fatigue arrive plus vite dans la journée pour la condition de parole.

Résultats bruts du modèle R pour la fatigue générale:

MFI_fatigue_gnrle ~ s(Condition, Moment_journee, k = 10)

Parametric coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
--	----------	------------	---------	----------

(Intercept)	2.41261	0.03412	70.71	<2e-16 ***
-------------	---------	---------	-------	------------

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Approximate significance of smooth terms:

	edf	Ref.df	F	p-value
--	-----	--------	---	---------

s(Condition, Moment_journee)	3.79	4.915	5.444	7.13e-05 ***
------------------------------	------	-------	-------	--------------

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

R-sq.(adj) = 0.0354 Deviance explained = 4.07%

GCV = 0.80997 Scale est. = 0.80435 n = 691

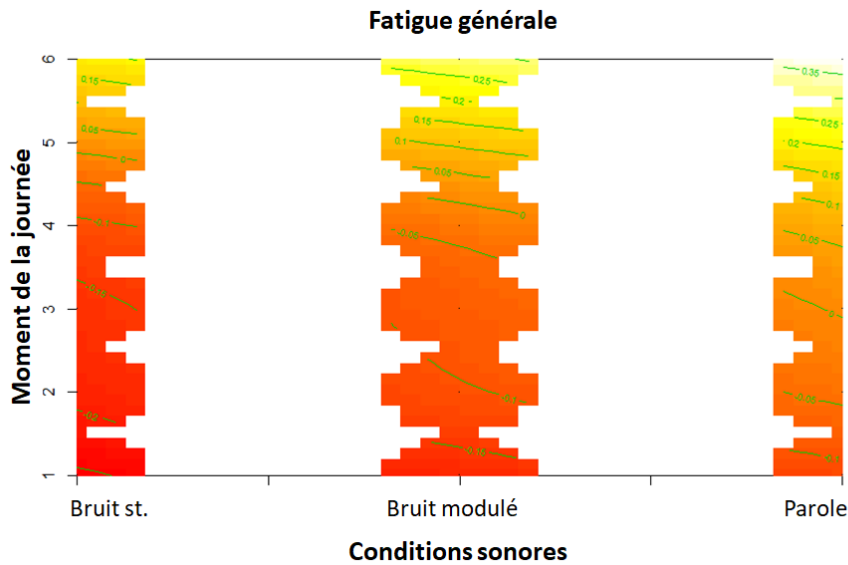


Figure 0.7. Fatigue générale

Fatigue mentale

Le modèle qui explique le pourcentage de variance de la fatigue mentale le plus élevé ($R^2 = 0,0567$ variance expliquée (« deviance explained ») = 6,38 %), est le modèle prenant en considération l'interaction entre le moment de la journée et les conditions sonores ($F = 19,08$ $p < 0,0001$). Sur la figure 0.8 est représentée la relation entre la fatigue mentale et l'interaction entre le moment de la journée et les conditions sonores. La couleur rouge correspond à la fatigue mentale en dessous du score moyen et la couleur jaune correspond à la fatigue mentale au-dessus du score moyen. Cette figure montre que la fatigue mentale augmente avec le moment de la journée et cette augmentation de fatigue arrive plus vite dans la journée pour la condition de parole.

Résultats bruts du modèle R pour la fatigue mentale:

MFI_fatigue_mentale ~ s(Condition, Moment_journee, k = 11)

Parametric coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	2.38664	0.03398	70.24	<2e-16 ***

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Approximate significance of smooth terms:

```

      edf Ref.df    F  p-value
s(Condition, Moment_journee) 5.182  6.76 6.347 5.26e-07 ***

```

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

R-sq.(adj) = 0.0567 Deviance explained = 6.38%

GCV = 0.80493 Scale est. = 0.79773 n = 691

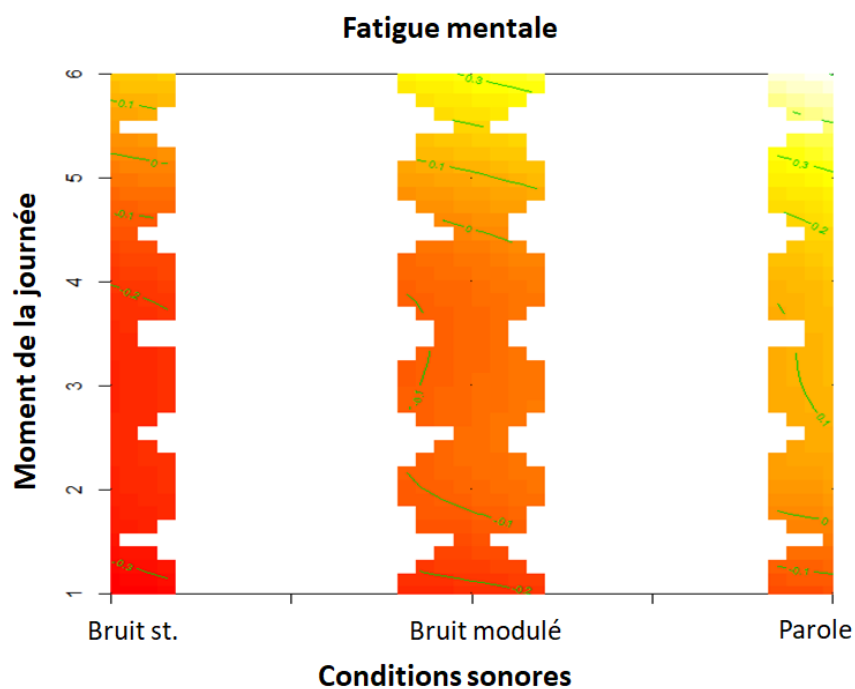


Figure 0.8. Fatigue mentale

Tension

Le modèle qui explique le pourcentage de variance de la tension le plus élevé ($R^2 = 0,348$ variance expliquée (« deviance explained ») = 35,9 %), est le modèle prenant en considération l'interaction

entre la fatigue mentale et les conditions sonores ($F = 19,08$ $p < 0,0001$) et le moment de la journée ($F = 1,583$ $p = 0,309$). Sur la figure 0.9 sont représentées la relation entre la tension et l'interaction entre la fatigue mentale et les conditions sonores (à gauche) et la relation entre la tension et le moment de la journée (à droite). Pour le graphique de gauche, la couleur rouge correspond à la tension en dessous du score moyen et la couleur jaune correspond à la tension au-dessus du score moyen.

Cette figure montre que la tension augmente avec la fatigue mentale et cette augmentation de fatigue arrive plus vite pour la condition de parole. En revanche, les variations de la tension en fonction du moment de la journée sont très faibles pour avoir un effet significatif.

Résultats bruts du modèle R pour la tension:

```
Thayer_tension ~ s(Condition, MFI_fatigue_mentale, k = 10) +
  s(Moment_journee, k = 5)
```

Parametric coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	0.448943	0.009541	47.05	<2e-16 ***

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Approximate significance of smooth terms:

	edf	Ref.df	F	p-value
s(Condition,MFI_fatigue_mentale)	8.555	8.946	38.331	<2e-16 ***
s(Moment_journee)	3.217	3.671	1.583	0.309

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

R-sq.(adj) = 0.348 Deviance explained = 35.9%

GCV = 0.064091 Scale est. = 0.062907 n = 691

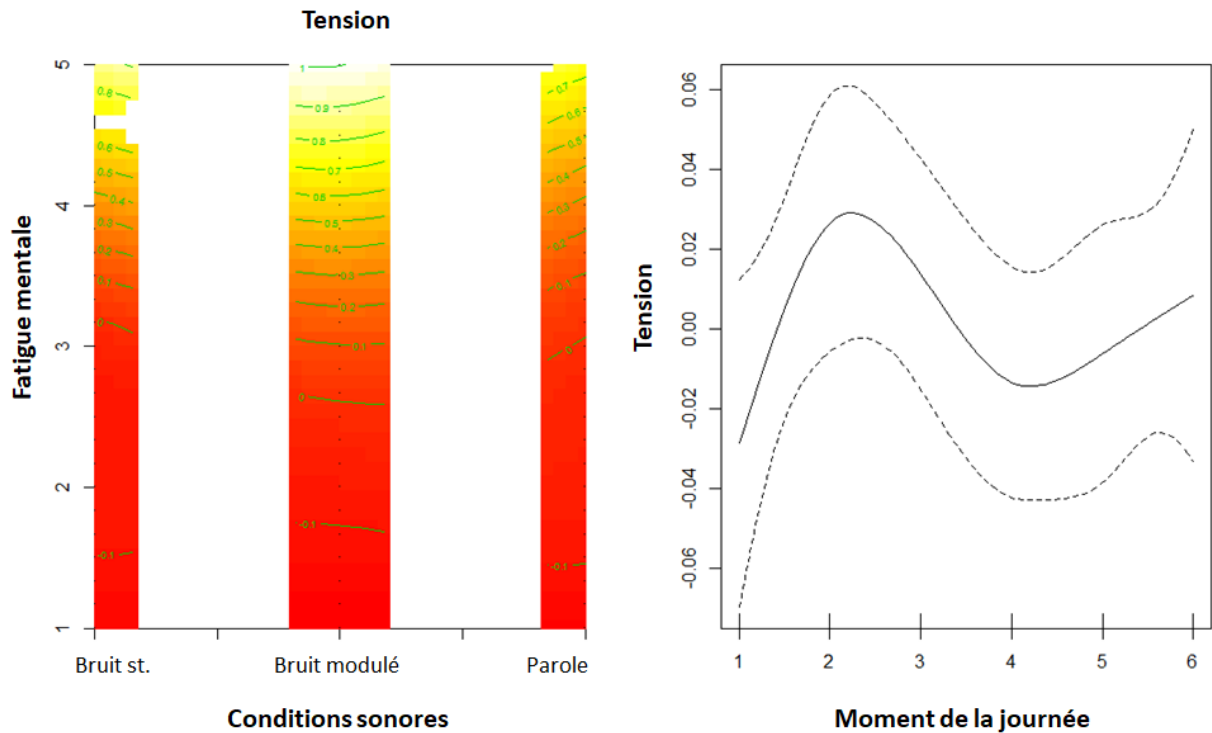


Figure 0.9. Tension

Vigilance

Le modèle qui explique le pourcentage de variance de la tension le plus élevé ($R^2 = 0,685$ variance expliquée (« deviance explained ») = 68,7 %), est le modèle prenant en considération l'interaction entre le moment de la journée et les conditions sonores ($F = 0,152$ $p = 0,859$) et le fatigue générale ($F = 374,97$ $p < 0,0001$). Sur la figure 0.10 sont représentées la relation entre la vigilance et l'interaction entre le moment de la journée et les conditions sonores (à gauche) et la relation entre la vigilance et la fatigue générale (à droite). Pour le graphique de gauche, la couleur rouge correspond à la vigilance au-dessus du score moyen et la couleur jaune correspond à la vigilance en dessous du score moyen.

Cette figure montre que la vigilance décroît avec l'augmentation de la fatigue générale.

Résultats bruts du modèle R pour la vigilance:

Thayer_vigilance ~ s(Condition, Moment_journee, k = 10) + s(MFI_fatigue_gnrle,
k = 5)

Parametric coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	2.01573	0.02357	85.52	<2e-16 ***

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Approximate significance of smooth terms:

	edf	Ref.df	F	p-value
s(Condition,Moment_journee)	2.000	2.000	0.152	0.859
s(MFI_fatigue_gnrle)	3.581	3.898	374.967	<2e-16 ***

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

R-sq.(adj) = 0.685 Deviance explained = 68.7%

GCV = 0.3876 Scale est. = 0.38391 n = 691

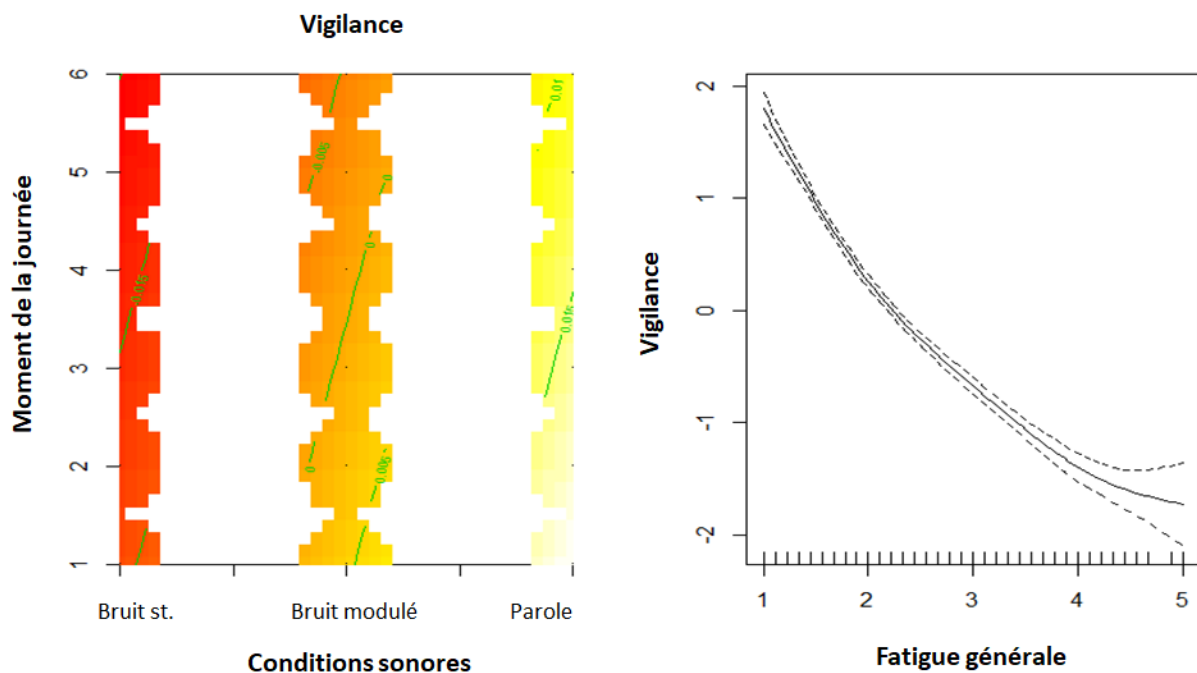


Figure 0.10. Vigilance

Somnolence KSS

Le modèle qui explique le pourcentage de variance de la somnolence le plus élevé ($R^2 = 0,679$ variance expliquée (« deviance explained ») = 68,3 %), est le modèle prenant en considération l'interaction entre la tension et la vigilance ($F = 153,522$ $p < 0,0001$) et le moment de la journée ($F = 2,574$ $p = 0,07$). Sur la figure 0.11 sont représentées la relation entre la somnolence et l'interaction entre la vigilance et la tension (à droite) et la relation entre la somnolence et le moment de la journée (à gauche). Pour le graphique de droite, la couleur rouge correspond à la somnolence en dessous du score moyen et la couleur jaune correspond à la somnolence au-dessus du score moyen. Cette figure montre que la somnolence décroît de façon non-significative ($p = 0,07$ proche du seuil de significativité) au cours de la journée. Ensuite, le graphique de droite montre que la somnolence est sensible aux variations de la vigilance. Quel que soit la valeur de la tension, la somnolence décroît avec la baisse de vigilance. Pour des valeurs de vigilance $< 1,5$ et la tension n'a pas d'impact sur la somnolence. En revanche, pour des valeurs de vigilance $> 1,5$ nous observons une augmentation de la somnolence avec l'augmentation de la tension et lorsque la vigilance baisse.

Résultats bruts du modèle R pour la somnolence:

```
KSS_somnolence ~ s(Moment_journee, k = 5) + s(Thayer_tension,  
  Thayer_vigilance, k = 11)
```

Parametric coefficients:

```
Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)  
(Intercept) 3.43642 0.03957 86.84 <2e-16 ***  
---  
Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

Approximate significance of smooth terms:

```
edf Ref.df F p-value  
s(Moment_journee) 1.680 2.067 2.574 0.07 .  
s(Thayer_tension,Thayer_vigilance) 8.179 9.388 153.522 <2e-16 ***
```

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

R-sq.(adj) = 0.679 Deviance explained = 68.3%

GCV = 1.101 Scale est. = 1.0837 n = 692

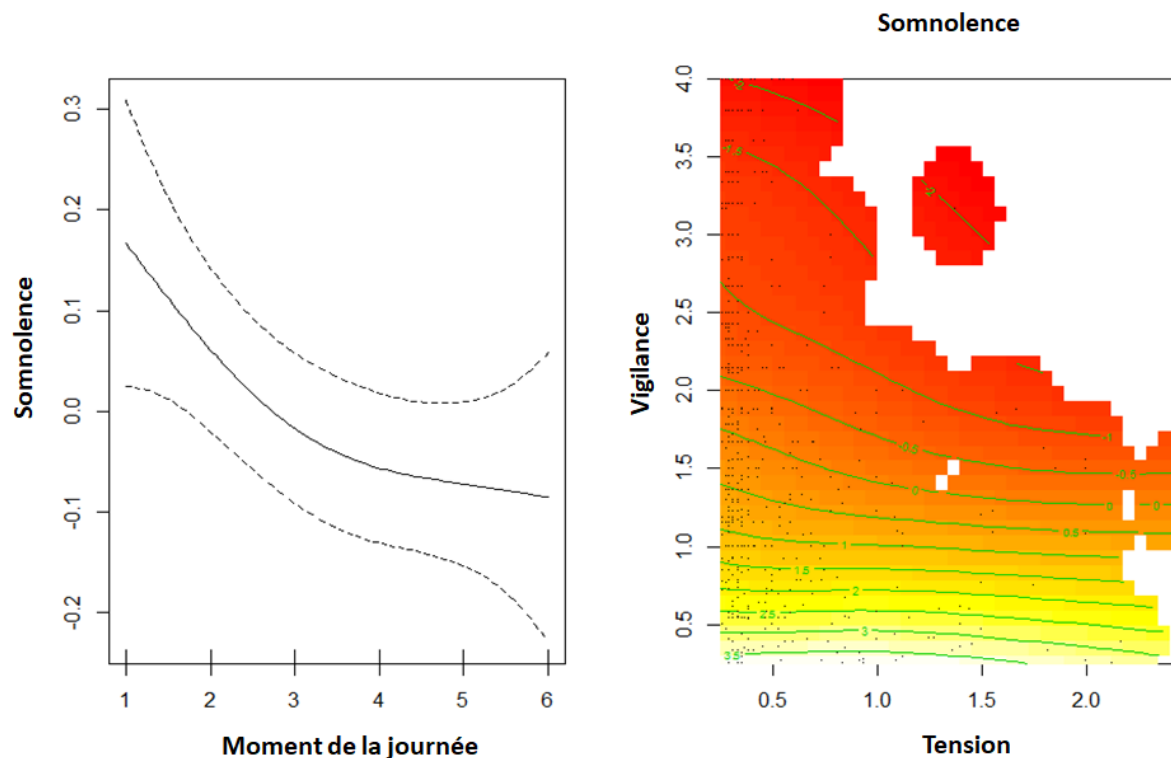


Figure 0.11. Somnolence

Gêne sonore, Calme-Bruyant et Fatigue sonore

Le modèle qui explique le pourcentage de variance de la gêne sonore le plus élevé ($R^2 = 0,487$ variance expliquée (« deviance explained ») = 50,1 %), est le modèle prenant en considération l'interaction entre les conditions sonores et le moment de la journée ($F = 34,7$ $p < 0,0001$) et l'interaction entre la fatigue mentale et la somnolence ($F = 19,84$ $p < 0,0001$). Sur la figure 0.12 sont représentées la relation entre la gêne sonore et l'interaction entre la somnolence et la fatigue mentale (à droite) et la relation entre la somnolence et l'interaction entre les conditions sonores et le moment de la journée (à gauche). Pour le graphique de droite, la couleur rouge correspond à la gêne

sonore en dessous du score moyen et la couleur jaune correspond à la gêne sonore au-dessus du score moyen.

Ensuite, le modèle qui explique le pourcentage de variance de calme-bruyant le plus élevé ($R^2 = 0,424$ variance expliquée (« deviance explained ») = 43,9 %), est le modèle prenant en considération l'interaction entre les conditions sonores et le moment de la journée ($F = 32,47$ $p < 0,0001$) et l'interaction entre la fatigue mentale et la somnolence ($F = 11,64$ $p < 0,0001$). Sur la figure 0.13 sont représentées la relation entre calme-bruyant et l'interaction entre la somnolence et la fatigue mentale (à droite) et la relation entre calme-bruyant et l'interaction entre les conditions sonores et le moment de la journée (à gauche). Pour le graphique de droite, la couleur rouge correspond aux scores de calme-bruyant en dessous du score moyen et la couleur jaune correspond aux scores de calme-bruyant au-dessus du score moyen.

En dernier, le modèle qui explique le pourcentage de variance de la fatigue sonore le plus élevé ($R^2 = 0,48$ variance expliquée (« deviance explained ») = 49,4 %), est le modèle prenant en considération l'interaction entre les conditions sonores et le moment de la journée ($F = 30,09$ $p < 0,0001$) et l'interaction entre la fatigue mentale et la somnolence ($F = 23,05$ $p < 0,0001$). Sur la figure 0.14 sont représentées la relation entre la fatigue sonore et l'interaction entre la somnolence et la fatigue mentale (à droite) et la relation entre la fatigue sonore et l'interaction entre les conditions sonores et le moment de la journée (à gauche). Pour le graphique de droite, la couleur rouge correspond à la fatigue sonore en dessous du score moyen et la couleur jaune correspond à la fatigue sonore au-dessus du score moyen.

Pour les trois indicateurs, nous observons une augmentation des trois indicateurs lorsque dès que les participants sont exposés aux bruits (différence entre les moments 1 et 4, dans le silence, et les moments 2, 3, 5 et 6 dans le bruit). Donc, il y a bien un effet de l'exposition aux bruits par rapport au silence. Ensuite, pour mieux comprendre les différences entre les conditions sonores il est conseillé de regarder les RM-ANOVA présentées dans la partie 4.3.2 de la thèse.

Ce qui est intéressant dans ces analyses de l'évaluation subjective de l'environnement sonore est l'effet de l'interaction entre la somnolence et la fatigue mentale. Les participants trouvent le bruit plus gênant plus bruyant et plus fatigant lorsque la somnolence est élevée et la fatigue mentale est élevée. Lorsque la somnolence et la fatigue mentale sont faibles les trois indicateurs décroissent jusqu'à 20 % du score moyen.

Résultats bruts du modèle R pour la gêne sonore:

ISE_genant ~ s(Condition, Moment_journee, k = 11) + s(MFI_fatigue_mentale,
KSS_somnolence, k = 11)

Parametric coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	35.7438	0.9234	38.71	<2e-16 ***

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Approximate significance of smooth terms:

	edf	Ref.df	F	p-value
s(Condition, Moment_journee)	9.825	9.994	34.70	<2e-16 ***
s(MFI_fatigue_mentale,KSS_somnolence)	8.863	9.754	19.84	<2e-16 ***

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

R-sq.(adj) = 0.487 Deviance explained = 50.1%

GCV = 606.43 Scale est. = 589.16 n = 691

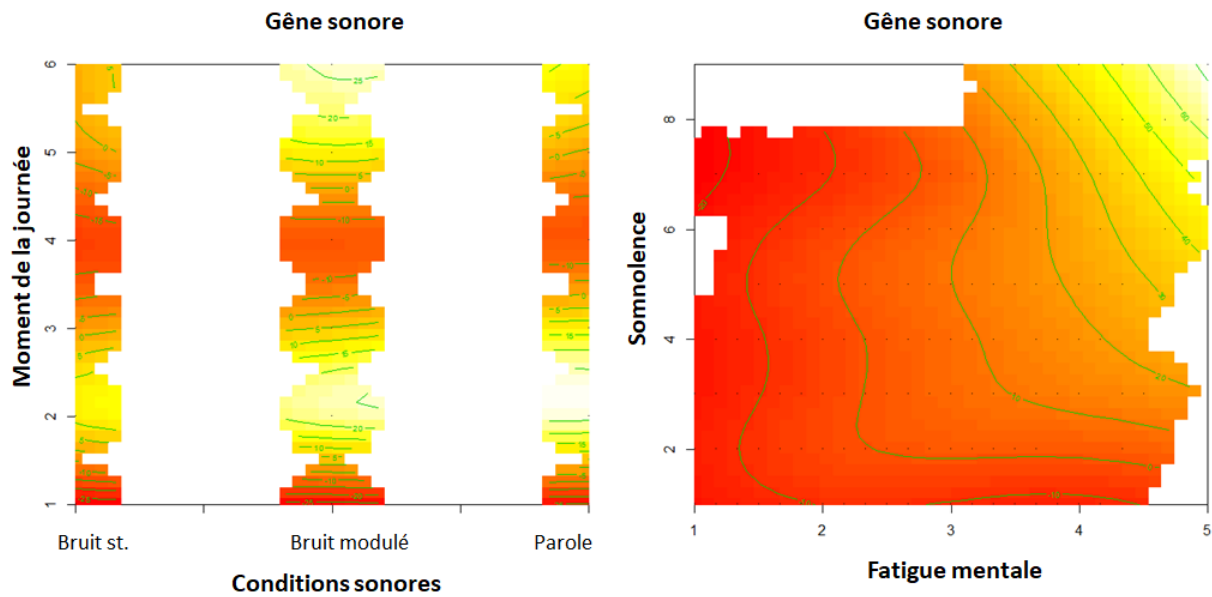


Figure 0.12. Gêne sonore

Résultats brutes du modèle R pour calme - bruyant:

```
ISE_calme_bruyant ~ s(Condition, Moment_journee, k = 11) + s(MFI_fatigue_mentale,
  KSS_somnolence, k = 11)
```

Parametric coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	36.783	1.022	35.98	<2e-16 ***

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Approximate significance of smooth terms:

	edf	Ref.df	F	p-value
s(Condition, Moment_journee)	9.797	9.992	32.47	<2e-16 ***
s(MFI_fatigue_mentale, KSS_somnolence)	8.607	9.639	11.64	<2e-16 ***

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

R-sq.(adj) = 0.424 Deviance explained = 43.9%

GCV = 743.08 Scale est. = 722.21 n = 691

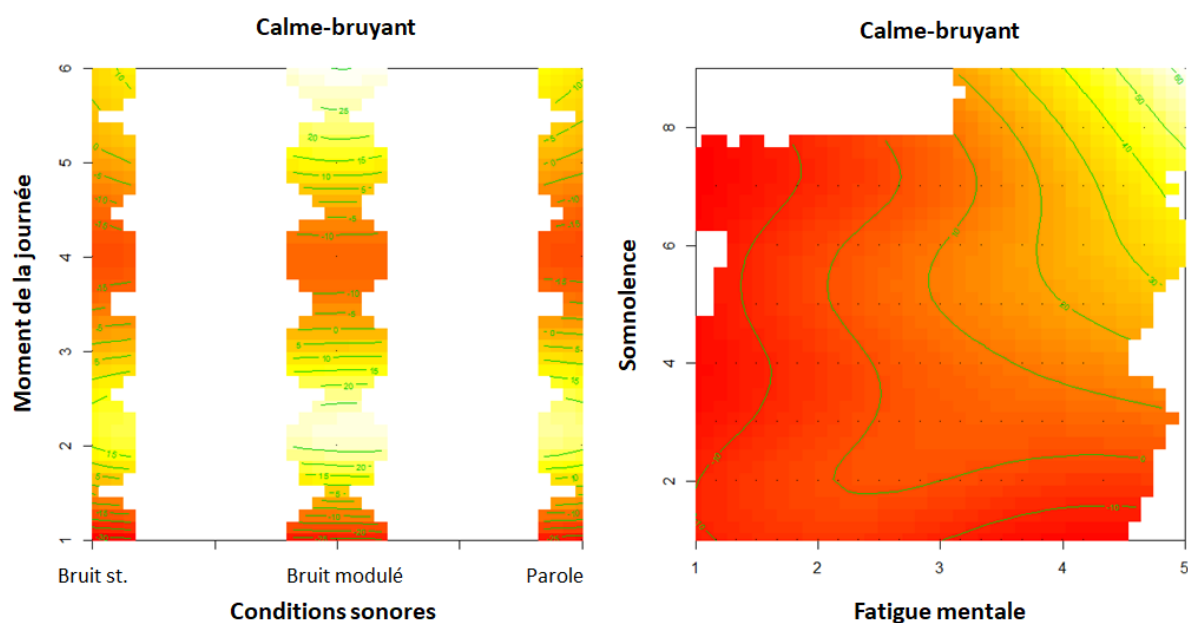


Figure 0.13. Calme-bruyant

Résultats brutes du modèle R pour la fatigue sonore:

ISE_fatigant ~ s(Condition, Moment_journee, k = 11) + s(MFI_fatigue_mentale,
KSS_somnolence, k = 11)

Parametric coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	35.2185	0.8932	39.43	<2e-16 ***

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Approximate significance of smooth terms:

	edf	Ref.df	F	p-value
s(Condition, Moment_journee)	9.761	9.990	30.09	<2e-16 ***
s(MFI_fatigue_mentale, KSS_somnolence)	8.670	9.669	23.05	<2e-16 ***

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

R-sq.(adj) = 0.48 Deviance explained = 49.4%

GCV = 567.21 Scale est. = 551.26 n = 691

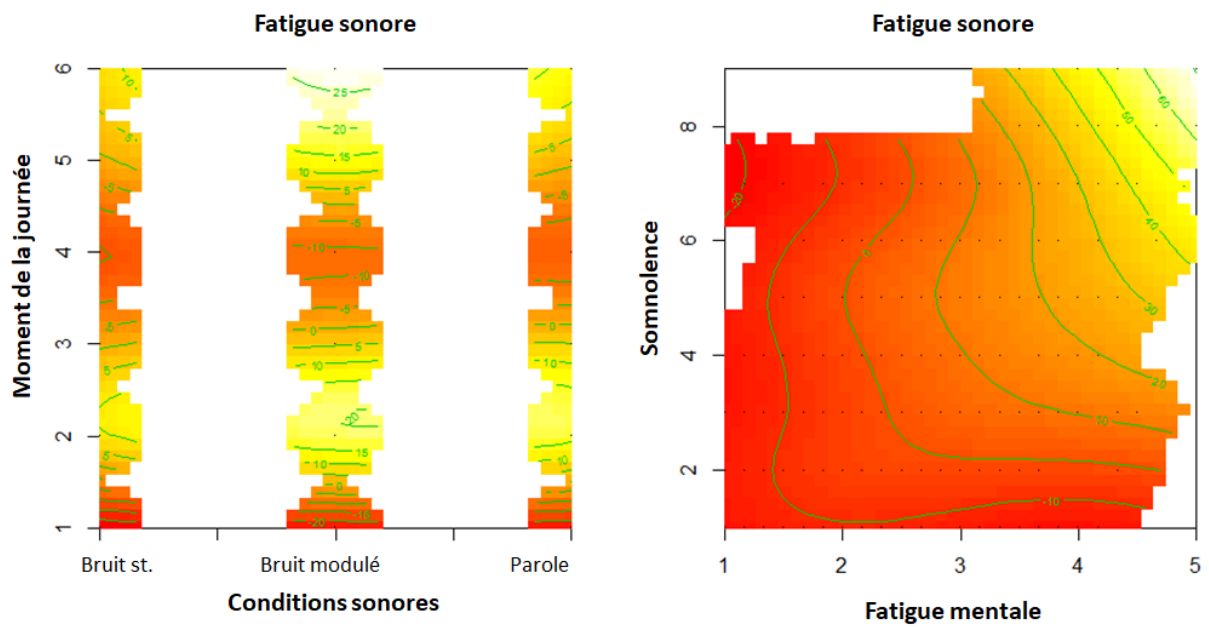


Figure 0.14. Fatigue sonore



FOLIO ADMINISTRATIF

THESE DE L'UNIVERSITE DE LYON OPEREE AU SEIN DE L'INSA LYON

NOM : KOSTALLARI

DATE de SOUTENANCE : 08/04/2019

Prénoms : Krist

TITRE : Contribution à l'étude des effets psychologiques du bruit de parole dans les bureaux ouverts

NATURE : Doctorat

Numéro d'ordre : 2019LYSEI024

Ecole doctorale : Mécanique, Energétique, Génie Civil, Acoustique

Spécialité : Acoustique

RESUME :

Il est aujourd'hui accepté que le bruit de parole représente la principale source de gêne pour les employés des bureaux ouverts. L'objectif de ce travail est d'évaluer les effets psychophysologiques de la parole intelligible sur les salariés effectuant une ou plusieurs tâches. Pour répondre à cet objectif, deux expériences ont été réalisées. La première a pour but d'évaluer le décretement de performance (DP) lors d'une tâche de sériation pour de fortes valeurs d'intelligibilité. L'indicateur acoustique choisi est le STI (« Speech Transmission Index »). Les résultats de l'étude menée auprès de cinquante-cinq participants montrent un effet du STI sur le DP. Cependant, cette expérience a une validité écologique réduite puisqu'elle est de courte durée et qu'elle est limitée à une tâche très spécifique.

La deuxième expérience a donc pour but d'élaborer des tests en laboratoire plus proches des conditions de travail en bureau ouvert et d'étudier l'effet de la parole intelligible sur des indicateurs psychologiques. Trente-neuf participants ont participé à cette expérimentation. Plusieurs mesures telles que la fatigue psychologique, la gêne sonore et la charge mentale de travail ont été réalisées. Les participants ont été soumis à trois conditions sonores différentes (bruit stationnaire, bruit modulé et parole) durant trois journées. Chaque jour, les participants ont réalisé leur travail en étant exposés à la même condition sonore pendant 6h45min. Les résultats montrent un effet de la parole sur l'état psychologique des participants. La parole semble être la source de bruit la plus fatigante et la plus gênante. Elle entraîne également une charge mentale supplémentaire.

Au-delà des résultats de ces expériences, les modèles psychologiques mobilisés lors de cette thèse peuvent être adaptés pour mener des enquêtes *in-situ* afin d'évaluer et prévenir les risques psychologiques liés aux bruits dans les bureaux ouverts.

MOTS-CLÉS : Acoustique, Bruit, Intelligibilité, Parole, Gêne sonore, Fatigue psychologique, Charge mentale de travail, Mémoire, Bureau ouvert

Laboratoire (s) de recherche : Laboratoire Vibrations Acoustique

Directeur de thèse: Etienne PARIZET et Edith GALY

Président de jury : Delphine BARD

Composition du jury : Delphine BARD (Rapporteuse), Claudine Mélan (Rapporteuse), Andreas LIEBL (Examinateur), Etienne PARIZET (Co-directeur), Edith GALY (Co-directrice), Patrick CHEVRET (Co-encadrant), Louis LAURENT (Invité)