



HAL
open science

Gêne dans les bureaux ouverts : Incertitudes des indicateurs de la norme ISO 3382 3 et proposition d'amélioration de la norme ISO 22955

Lucas Lenne

► **To cite this version:**

Lucas Lenne. Gêne dans les bureaux ouverts : Incertitudes des indicateurs de la norme ISO 3382 3 et proposition d'amélioration de la norme ISO 22955. Acoustique [physics.class-ph]. INSA de Lyon, 2022. Français. NNT : 2022ISAL0080 . tel-04148727

HAL Id: tel-04148727

<https://theses.hal.science/tel-04148727>

Submitted on 3 Jul 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



N°d'ordre NNT : 2022ISAL0080

**THESE de DOCTORAT DE L'INSA LYON,
membre de l'Université de Lyon**

**Ecole Doctorale N° 162
Mécanique, Énergétique, Génie Civil, Acoustique**

**Spécialité/ discipline de doctorat :
Acoustique**

Soutenue publiquement le 07/10/2022, par :
Lucas Lenne

**Gêne dans les bureaux ouverts :
Incertitudes des indicateurs de la
norme ISO 3382-3 et proposition
d'amélioration de la norme ISO 22955**

Devant le jury composé de :

M. Tapio LOKKI	Professeur, Aalto University	Président
Mme Édith GALY	Professeure, Université Côte d'Azur	Rapporteure
M. Judicaël PICAUT	Directeur de recherche, Université Gustave Eiffel	Rapporteur
M. Tapio LOKKI	Professeur, Aalto University	Examineur
M. Étienne PARIZET	Professeur, Université de Lyon	Directeur de thèse
M. Patrick CHEVRET	Habilité à Diriger des Recherches, INRS	Co-directeur de thèse
M. Jack HARVIE-CLARK	Master, Apex Acoustics	Invité

Département FEDORA – INSA Lyon - Ecoles Doctorales

SIGLE	ECOLE DOCTORALE	NOM ET COORDONNEES DU RESPONSABLE
CHIMIE	<u>CHIMIE DE LYON</u> https://www.edchimie-lyon.fr Sec. : Renée EL MELHEM Bât. Blaise PASCAL, 3e étage secretariat@edchimie-lyon.fr	M. Stéphane DANIELE C2P2-CPE LYON-UMR 5265 Bâtiment F308, BP 2077 43 Boulevard du 11 novembre 1918 69616 Villeurbanne directeur@edchimie-lyon.fr
E.E.A.	<u>ÉLECTRONIQUE, ÉLECTROTECHNIQUE, AUTOMATIQUE</u> https://edeea.universite-lyon.fr Sec. : Stéphanie CAUVIN Bâtiment Direction INSA Lyon Tél : 04.72.43.71.70 secretariat.edeea@insa-lyon.fr	M. Philippe DELACHARTRE INSA LYON Laboratoire CREATIS Bâtiment Blaise Pascal, 7 avenue Jean Capelle 69621 Villeurbanne CEDEX Tél : 04.72.43.88.63 philippe.delachartre@insa-lyon.fr
E2M2	<u>ÉVOLUTION, ÉCOSYSTÈME, MICROBIOLOGIE, MODÉLISATION</u> http://e2m2.universite-lyon.fr Sec. : Bénédicte LANZA Bât. Atrium, UCB Lyon 1 Tél : 04.72.44.83.62 secretariat.e2m2@univ-lyon1.fr	Mme Sandrine CHARLES Université Claude Bernard Lyon 1 UFR Biosciences Bâtiment Mendel 43, boulevard du 11 Novembre 1918 69622 Villeurbanne CEDEX sandrine.charles@univ-lyon1.fr
EDISS	<u>INTERDISCIPLINAIRE SCIENCES-SANTÉ</u> http://ediss.universite-lyon.fr Sec. : Bénédicte LANZA Bât. Atrium, UCB Lyon 1 Tél : 04.72.44.83.62 secretariat.ediss@univ-lyon1.fr	Mme Sylvie RICARD-BLUM Institut de Chimie et Biochimie Moléculaires et Supramoléculaires (ICBMS) - UMR 5246 CNRS - Université Lyon 1 Bâtiment Raulin - 2ème étage Nord 43 Boulevard du 11 novembre 1918 69622 Villeurbanne Cedex Tél : +33(0)4 72 44 82 32 sylvie.ricard-blum@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. Hamamache KHEDDOUCI Université Claude Bernard Lyon 1 Bât. Nautibus 43, Boulevard du 11 novembre 1918 69 622 Villeurbanne Cedex France Tél : 04.72.44.83.69 hamamache.kheddouci@univ-lyon1.fr
Matériaux	<u>MATÉRIAUX DE LYON</u> http://ed34.universite-lyon.fr Sec. : Yann DE ORDENANA Tél : 04.72.18.62.44 yann.de-ordenana@ec-lyon.fr	M. Stéphane BENAYOUN Ecole Centrale de Lyon Laboratoire LTDS 36 avenue Guy de Collongue 69134 Ecully CEDEX Tél : 04.72.18.64.37 stephane.benayoun@ec-lyon.fr
MEGA	<u>MÉCANIQUE, ÉNERGÉTIQUE, GÉNIE CIVIL, ACOUSTIQUE</u> http://edmega.universite-lyon.fr Sec. : Stéphanie CAUVIN Tél : 04.72.43.71.70 Bâtiment Direction INSA Lyon mega@insa-lyon.fr	M. Jocelyn BONJOUR INSA Lyon Laboratoire CETHIL Bâtiment Sadi-Carnot 9, rue de la Physique 69621 Villeurbanne CEDEX jocelyn.bonjour@insa-lyon.fr
ScSo	<u>ScSo*</u> https://edsciencesociales.universite-lyon.fr Sec. : Mélina FAVETON INSA : J.Y. TOUSSAINT Tél : 04.78.69.77.79 melina.faveton@univ-lyon2.fr	M. Christian MONTES Université Lumière Lyon 2 86 Rue Pasteur 69365 Lyon CEDEX 07 christian.montes@univ-lyon2.fr

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

Remerciements

Je tiens, tout d'abord, à adresser mes plus vifs remerciements à mes deux co-directeurs de thèse Patrick Chevret et Étienne Parizet, pour m'avoir accompagné dans la construction de cette thèse. Je remercie Patrick pour son suivi quotidien et pour avoir supporté, toujours avec patience et bienveillance, mon esprit parfois trop mathématique. Je remercie Étienne pour son œil incisif capable d'identifier, toujours avec justesse et pertinence, les faiblesses des raisonnements. Sans votre encadrement très complémentaire, cette thèse n'aurait pas été aussi aboutie.

Je remercie également l'INRS qui m'a fait confiance, et qui m'a permis de réaliser cette thèse dans des conditions idéales. Mes remerciements s'adressent plus particulièrement au laboratoire d'acoustique qui m'a accueilli, au départ pour un stage de fin d'étude, et qui m'a donné l'envie de continuer dans le monde de la recherche. Merci donc à Adil, Antoine, François, Geneviève, Joël, Jean-Pierre, Jonathan, Julien, Marion, Laurent et même Nicolas. Je n'oublie pas de remercier Kévin, Krist et Ossen qui m'ont montré qu'il est possible, non seulement de survivre à ces trois ans, mais surtout de s'épanouir durant la préparation d'une thèse. Merci aussi au LVA et à ses doctorants qui m'ont accueilli chaleureusement pendant un mois, et ce malgré mon inaptitude manifeste à la pratique des fléchettes.

Je tiens également à remercier mes amis : Priscillia, Paul, Aurélien, Julie, Bebert et tous les autres pour m'avoir offert de doux moments de déconnexion. Les visio-apéros lors des longs mois de confinement ont été pour moi de véritables bouffées d'air frais.

Enfin, j'adresse mes plus profonds sentiments de gratitude à ma famille sans qui je ne serais pas là. Pap' et Mam' merci de m'avoir permis de faire les études que je voulais, même s'il n'a pas été facile de me voir partir à Lyon, puis à Nancy. Merci à mes frères, Thomas, Simon et Louis, pour avoir fait ce que des frères font. Merci à mes grands-parents pour avoir cultivé ma curiosité dans tous les domaines, malgré mon appétence manifeste pour les sciences dures. Et merci à toute la famille pour sa bonne humeur et son soutien. Un petit rappel pour certains d'entre vous : ce n'est pas parce que je suis un ingénieur qui fait de la recherche en acoustique que je suis ingénieur du son...

Résumé :

La qualité acoustique des bureaux ouverts est évaluée au travers de la capacité de l'aménagement à limiter la propagation du bruit de parole, qui constitue la source principale de gêne dans ces espaces de travail. Pour cela, deux normes sont disponibles : la norme ISO 3382-3 qui est une norme de mesurage et la norme ISO 22955 qui fixe des valeurs cibles pour le local et l'environnement sonore.

La norme ISO 3382-3 définit des indicateurs caractérisant la décroissance spatiale du niveau de la parole et de son intelligibilité et en fixe des valeurs d'incertitudes. Cependant, ce dernier point est encore sujet à discussion. Une étude spécifique a été réalisée dans ce travail de thèse sur la base de développements analytiques et de simulations numériques. Cette étude met en évidence que les incertitudes des indicateurs sont relativement faibles et peuvent être estimées à l'aide d'expressions simples. Elle souligne également qu'il est problématique de caractériser la performance acoustique d'un bureau à l'aide d'une valeur unique des indicateurs, comme le préconise la norme.

La norme ISO 22955 fixe des valeurs cibles pour les indicateurs et traite des bureaux hébergeant plusieurs activités, pour lesquels les indicateurs existants sont inadaptés. Pour cela, elle s'appuie sur une nouvelle approche basée sur l'animation (liveliness) des activités réalisées. Une expérience de laboratoire, étudiant la pertinence de cette approche, a été réalisée. Huit conditions sonores ont été simulées à partir de la superposition d'une discussion provenant d'un espace de pause ou d'un centre d'appels et d'un bruit de ventilation. 32 sujets devaient réaliser une revue de presse durant 35 minutes. Leur perception de l'environnement sonore, leur fatigue ressentie et la charge mentale de travail ont été évaluées. Les résultats mettent en évidence que le type de discussion impacte significativement les effets du bruit lorsque la parole est intelligible.

Table des matières

Table des matières	2
Table des Figures	4
Introduction.....	7
Chapitre I. État de l’art	11
I.1. Performance acoustique du local.....	11
I.1.1. Décroissance spatiale de l’intelligibilité.....	11
I.1.2. Décroissance spatiale du niveau de la parole	18
I.1.3. Lacunes de la norme ISO 3382-3.....	21
I.2. Qualité de l’environnement sonore	22
I.3. Objectivation de la qualité de l’environnement sonore	24
Chapitre II. Incertitudes de mesure des indicateurs acoustiques de la norme ISO 3382-3	29
II.1. La norme ISO 3382-3	30
II.1.1. Mesure des indicateurs.....	30
II.1.2. Incertitudes de mesure des indicateurs.....	34
II.2. Sources d’incertitudes.....	35
II.2.1. Incertitudes des intermédiaires de calcul	36
II.2.2. Incertitudes liées au positionnement de l’instrumentation	37
II.3. Approche analytique	38
II.4. Approche numérique	42
II.4.1. Le bureau simulé	43
II.4.2. Description de la méthode.....	44
II.4.3. Résultats.....	46
II.5. Incertitudes de mesure pour le cas d’étude	47
II.6. Comparaison avec les expressions analytiques	50
II.7. Question de la valeur unique	55
II.8. Conclusion	59
Chapitre III. Gêne dans les bureaux multi-activités dans le cadre de la norme ISO 22955 : expérience de laboratoire.....	61
III.1. Qualité de l’environnement sonore des bureaux multi-activités	62
III.1.1. Caractérisation de l’environnement sonore	62
III.1.2. Définition du DAS et établissement des valeurs cibles.....	65
III.2. Expérience de laboratoire	70
III.2.1. Construction des pistes sonores	71
III.2.2. Expérience préliminaire : évaluation objective des effets.....	72
III.2.3. Expérience longue : évaluation subjective des effets.....	77
III.3. Conclusion	92

Chapitre IV. Analyse critique des indicateurs acoustiques	93
IV.1. Performance acoustique du local	93
IV.2. Lien entre performance du local et qualité de l'environnement sonore	96
IV.3. Qualité acoustique des bureaux ouverts	103
Conclusion	109
Références.....	113
Annexe A. Développements des expressions analytiques des incertitudes de mesure	121
Annexe B. Simplification des expressions analytiques des incertitudes de mesure	127
Annexe C. Questionnaires et revues de presse.....	137

Table des Figures

FIGURE I-1 : RELATION ENTRE LE STI ET LE SCORE D'INTELLIGIBILITE POUR DES PHRASES, DES SYLLABES DE TYPE CONSONNE-VOYELLE-CONSONNE (CVC_{EQB}) ET DES MOTS PHONETIQUEMENT EQUILIBRES (MOTS-PB). LA FIGURE EST TIREE DE LA NORME IEC 60268-16 (2020) [11].	13
FIGURE I-2 : RELATION ENTRE LE DECREMENT DE PERFORMANCE ET L'INTELLIGIBILITE DU BRUIT DE PAROLE POUR UNE TACHE DE MEMOIRE SERIELLE. LA FIGURE EST TIREE DE HAAPAKANGAS ET AL. (2020).	15
FIGURE I-3 : DETERMINATION GRAPHIQUE DE LA DISTANCE DE DISTRACTION R_d .	17
FIGURE I-4 : SPECTRES DE LA PAROLE MASCULINE (MESUREE A 1 METRE EN CHAMP LIBRE) UTILISE POUR LA MESURE DU STI DANS LES NORMES IEC 60268-16 (2020) ET ISO 3382-3 (2022) OU DU SII DANS LA NORME ANSI S3.5 :1997. LES SPECTRES CORRESPONDENT A UN NIVEAU GLOBAL DE 57,4 dB(A).	18
FIGURE I-5 : DETERMINATION GRAPHIQUE DE LA D_{25} , DU NIVEAU L_{PAS4M} ET DE LA DISTANCE DE CONFORT.	19
FIGURE II-1 : EXEMPLES DE LIGNES POSSIBLES POUR LA MESURE DES INDICATEURS ACOUSTIQUES. LA FIGURE EST EXTRAITE DE LA NORME ISO 3382-3 (2022) [4].	31
FIGURE II-2 : DENSITE DE PROBABILITE DE L'ERREUR DE POSITIONNEMENT DE L'APPAREILLAGE DE MESURE DANS LES DEUX DIRECTIONS HORIZONTALES (E_x ET E_y) ET REPRESENTATION, DANS LE PLAN HORIZONTAL, DE LA DENSITE DE PROBABILITE DE L'ERREUR DE POSITIONNEMENT (95 % DES ERREURS SONT SITUEES DANS LE CARRE ROUGE).	38
FIGURE II-3 : PLAN DU BUREAU SIMULE DANS RAYPLUS. EN ROUGE SONT REPRESENTES LES CLOISONNETTES ACOUSTIQUES. LES QUATRE LIGNES DE MESURE P1-P4 SONT REPRESENTEES PAR LES LIGNES POINTILLEES. LES CERCLES REPRESENTENT LES POSITIONS DES MICROPHONES ET LES CROIX CERCLEES MARQUENT LES POSITIONS DES SOURCES ACOUSTIQUES. LES CLOISONNETTES ACOUSTIQUES SONT REPRESENTEES EN ROUGE SUR LE PLAN EN 2D DU BUREAU.	43
FIGURE II-4 : CARACTERISTIQUES ACOUSTIQUES DU PLAFOND ET DES CLOISONNETTES (A : COEFFICIENT D'ABSORPTION, TL : PERTE PAR TRANSMISSION).	44
FIGURE II-5 : SCHEMA DE PRINCIPE DE L'APPROCHE NUMERIQUE.	46
FIGURE II-6 : REPARTITION DES INDICATEURS POUR L'ENSEMBLE DES CONFIGURATIONS ACOUSTIQUES DU BUREAU.	47
FIGURE II-7 : INCERTITUDES ESTIMEES POUR CHAQUE LIGNE DE MESURE DANS CHAQUE CONFIGURATION.	48
FIGURE II-8 : INCERTITUDES DE MESURE EVALUEES A L'AIDE DES EXPRESSIONS ANALYTIQUES EN FONCTION DES VALEURS OBTENUES PAR LA SIMULATION POUR D_{25} (1), L_{PAS4M} (2), RC (3) ET R_d (4). (VALEURS EXACTES : CROIX BLEUES, VALEURS ARRONDIES AU DIXIEME SUPERIEUR : CERCLES ROUGES)	51
FIGURE II-9 : EN HAUT : CARTOGRAPHIE DE LA DIFFERENCE ENTRE LES CHAMPS DE PRESSION POUR DEUX POSITIONS DE LA SOURCE 4 (CERCLES BARRES). LES CERCLES REPRESENTENT LES POINTS DE MESURE DE LA LIGNE P4. EN BAS : DIFFERENCE ENTRE LES PRESSIONS DUES AUX DEUX SOURCES LE LONG DE LA LIGNE DE MESURE (SITUEES ENTRE LES DEUX FLECHES SUR LA CARTOGRAPHIE)	53
FIGURE II-10 : INCERTITUDES DE MESURE DU L_{PAS4M} EVALUEES A L'AIDE DES EXPRESSIONS ANALYTIQUES EN FONCTION DES VALEURS OBTENUES PAR LA SIMULATION LORSQU'UNE ERREUR DE POSITIONNEMENT EST FAITE UNIQUEMENT SUR LES MICROPHONES (1), UNIQUEMENT SUR LES SOURCES ACOUSTIQUES (2) ET A LA FOIS SUR LES MICROPHONES ET LES SOURCES ACOUSTIQUES (3). (VALEUR EXACTE : CROIX BLEUES, VALEURS ARRONDIES AU DIXIEME SUPERIEUR : CERCLES ROUGES)	54
FIGURE II-11 : NOMBRE DE LIGNES DE MESURE A TRACER EN FONCTION DU NOMBRE DE POSTES DE TRAVAIL PRESENTS DANS LE BUREAU D'APRES LA NORME VDI 2569.	55
FIGURE II-12 : VALEURS MOYENNES ET INTERVALLES DE CONFIANCE A 95 % DES INDICATEURS DANS CHAQUE CONFIGURATION ACOUSTIQUE DU BUREAU OUVERT SIMULE.	56
FIGURE II-13 : INCERTITUDES DE MESURE DE D_{25} LIEE AU CHOIX DE LA LIGNE DE MESURE D'APRES L'HYPOTHESE FAITE PAR SCHNEIDER ET AL. [57].	58
FIGURE III-1 : L_{Aeq} EVALUE SUR 5 MIN POUR UN BRUIT DE PAROLE (A GAUCHE) ET UN BRUIT DE VENTILATION (A DROITE). LES DEUX SIGNAUX ONT UN NIVEAU EQUIVALENT SUR 5 MIN DE 40 dB(A) EN NOIR : $L_{Aeq,125ms}$, EN ROUGE : $L_{Aeq,5min}$	63
FIGURE III-2 : PRINCIPE DE L'EVALUATION OBJECTIVE DU SCORE LE LIVELINESS MISE EN PLACE PAR VELLENGA ET AL. FIGURE EXTRAITE DE VELLENGA ET AL. [76].	65

FIGURE III-3 : EXEMPLE DE MESURE DU D_{AS} DANS LE CAS SIMPLE DE LA COHABITATION D'UN ESPACE DE REUNION (VERT) ET D'UN ESPACE OU L'ACTIVITE EST COLLABORATIVE (ROUGE). LA CROIX ENERCLEE REPRESENTA LA POSITION DE LA SOURCE ACOUSTIQUE ET LE CERCLE CELLE DU MICROPHONE.....	66
FIGURE III-4 : SPECTRES EN TIERS D'OCTAVE DES PISTES SONORES ET DU LTASS (HAUT) ET ECARTS DES PISTES SONORES AVEC LE LTASS (BAS).....	72
FIGURE III-5 : PROCEDURE DE L'EXPERIENCE DE MEMOIRE SERIELLE.....	74
FIGURE III-6 : PERFORMANCE MOYENNE (ET INTERVALLES DE CONFIANCE A 95 %) POUR CHACUN DES 10 BLOCS DE MESURES.....	75
FIGURE III-7 : DECREMENTS DE PERFORMANCE MOYENS ET INTERVALLES DE CONFIANCE A 95 %.....	76
FIGURE III-8 : BANC EXPERIMENTAL. PHOTO PRISE DEPUIS LE BUREAU DE L'EXPERIMENTATEUR (E). LA SOURCE (S) EST POSEE AU CENTRE DES QUATRE POSTES (1-4). LES POSTES VOISINS SONT SEPARES PAR UNE CLOISSONNETTE (EN ROUGE SUR LE SCHEMA).	78
FIGURE III-9 : HAUT : SPECTRES MOYENS DE LA PISTE SONORE "TRAVAIL INDIVIDUEL FOCALISE" AUX QUATRE POSTES (LES ECART TYPES CORRESPONDENT AUX VARIATIONS AUTOUR DE CHAQUE POSTE) ET SPECTRE DU BRUIT DE FOND MOYEN. BAS : DIFFERENCES ENTRE LES SPECTRES MOYENS ET LE SPECTRE NORMALISE DE LA PAROLE (LTASS).....	80
FIGURE III-10 : DEROULEMENT DE CHAQUE DEMI-JOURNEE D'ESSAIS.....	83
FIGURE III-11 : ÉVALUATION DE LA GENE CAUSEE PAR LES CONDITIONS SONORES.....	85
FIGURE III-12 : PERCEPTION DU NIVEAU DE BRUIT DES CONDITIONS SONORES.....	86
FIGURE III-13 : PERCEPTION DE L'ASPECT FATIGANT DES CONDITIONS SONORES.....	87
FIGURE III-14 : SCORES MESURES POUR LA DIMENSION RESSOURCES DISPONIBLES INSTANTANEEES.....	88
FIGURE III-15 : SCORES MESURES POUR LA DIMENSION CHARGE INTRINSEQUE.....	89
FIGURE III-16 : SCORES MESURES POUR LA DIMENSION CHARGE ESSENTIELLE.....	90
FIGURE III-17 : SCORES MESURES POUR LA FATIGUE MENTALE.....	91
FIGURE IV-1 : ZONE PERTURBEE PAR LE LOCUTEUR (CROIX) SUIVANT L'ISO 3382-3 (GAUCHE) ET EN PRENANT EN COMPTE LA « DIRECTIONNALITE » DE L'AMENAGEMENT DU BUREAU (DROITE) DANS LE CAS ETUDIE DANS LE CHAPITRE I (CONFIGURATION : CLOISSONNETTES DE CLASSE A D'UNE HAUTEUR DE 190 CM ASSOCIEE A UN PLAFOND DE CLASSE A). LES TRAITS ROUGES REPRESENTENT LES CLOISSONNETTES ACOUSTIQUES ET LES CERCLES NOIRS CORRESPONDENT AUX POSTES DE TRAVAIL.....	95
FIGURE IV-2 : PROPORTION DE REpondANTS FORTEMENT GENES PAR LE BRUIT (HDN) EN FONCTION DES INDICATEURS DE LA NORME ISO 3382-3 D'APRES MUELLER ET AL. [87].....	98
FIGURE IV-3 : LIEN ENTRE LA PROPORTION DE PERSONNES FORTEMENT GENEEES PAR LE BRUIT (HDN) ET CELLE PAR LES DISCUSSIONS (HDS).....	99
FIGURE IV-4 : REPRESENTATION DE LA PROPORTION DE PERSONNES SE DISANT FORTEMENT GENEEES PAR LES CONVERSATIONS (HDS) EN FONCTION DES INDICATEURS DU LOCAL A VIDE.....	100
FIGURE IV-5 : HDS EN FONCTION DU SNR ESTIME A 2,4 M (A GAUCHE) ET DE R_D (A DROITE) POUR LES DONNEES DE HAAPAKANGAS ET AL.....	101
FIGURE IV-6 : INCERTITUDES DE MESURE DE LA D_{AS} OBTENUES A L'AIDES DES SIMULATIONS DU CHAPITRE I.....	104
FIGURE IV-7 : PROPORTIONS DES PARTICIPANT AYANT CARACTERISEE LES DIFFERENTES CONDITIONS EXPERIMENTALES DE FORTEMENT GENANTE, BRUYANTE ET FATIGANTE (VALEUR MOYENNE ET ECART-TYPE).....	105

Introduction

Cette thèse s'inscrit dans le cadre de l'étude des maladies professionnelles causées par le bruit menée par l'Institut National de Recherche et de Sécurité (INRS). Historiquement, la problématique des risques liés au bruit sur le lieu de travail se limitait aux effets lésionnels du bruit, particulièrement dans le milieu industriel. La problématique du bruit dans les bureaux ouverts est toute différente. En effet, les niveaux de bruits mesurés dans ces espaces de travail sont bien inférieurs à la limite réglementaire d'exposition au bruit des salariés (celle-ci est fixée à un niveau d'exposition sur huit heures de 85 dB(A)). Cette absence d'effets lésionnels ne signifie pas que le bruit dans les open-spaces n'a aucun effet sur les personnes exposées. De fait, de nombreuses enquêtes ont mis en évidence que, dans ces espaces de travail, le bruit a de nombreux effets extra-auditifs [1–3]. Parmi eux, on peut notamment citer une gêne sonore, une perte de performance, ou encore une fatigue et un stress augmentés.

Un bureau ouvert, ou open-space, est un espace non-cloisonné dans lequel travaillent au moins cinq personnes. Cet aménagement est apparu dans les années 1950 et a connu un essor important à la fin du XX^e siècle, du fait de son attractivité financière pour les employeurs et de la tertiairisation du tissu industriel français. Cependant, ce type d'aménagement concentre dans un même espace de nombreuses sources de bruit (conversations, ventilation, bruit de passage, ...), ce qui n'est pas sans conséquences. D'après une enquête menée en avril 2011 par ACTINEO (Observatoire de la qualité de vie au travail) et TNS Sofres, près de 40 % des personnes travaillant dans un bureau ouvert se disent insatisfaites de leur environnement de travail, contre seulement 10 % des personnes travaillant dans un bureau individuel.

Aujourd'hui, 33 % des 20 millions d'actifs du secteur tertiaire travaillent dans un bureau ouvert. La prévention des risques professionnels liés au bruit dans les open-space constitue donc un sujet important pour l'INRS, dont la mission est de mettre en œuvre tous les moyens nécessaires pour prévenir les accidents du travail et les maladies professionnelles. Deux de ces moyens d'actions sont la recherche scientifique et la participation à la rédaction de normes, nationales ou internationales. Cette thèse se situe au croisement de ces deux moyens d'action.

La qualité acoustique des bureaux ouverts est, aujourd'hui, évaluée à l'aide de deux normes : la norme ISO 3382-3 (2022) [4] et la norme ISO 22955 (2021) [5]. Ces deux normes ont chacune leurs lacunes qui soulèvent aujourd'hui la question de la fiabilité des démarches de préventions mises en place.

La norme ISO 3382-3, publiée en 2012 et révisée en 2022, est une norme de mesure qui définit des indicateurs acoustiques caractérisant la performance acoustique des locaux hébergeant un bureau ouvert. Cette norme de mesure traite de manière élémentaire des incertitudes de mesure des indicateurs qu'elle définit. De plus, elle caractérise un bureau à l'aide d'une unique valeur de ces indicateurs. Ces deux observations soulèvent deux questions :

- Les indicateurs qu'elle définit sont-ils pertinents ? ou autrement dit : permettent-ils réellement de distinguer les bureaux ouverts ?
- Les bureaux caractérisés suivant cette norme sont-ils correctement décrits par cette valeur unique ?

La norme ISO 22955, publiée en 2021, fait des recommandations sur les performances acoustiques des locaux qui assurent un environnement acoustique de bonne qualité, à savoir, dans le contexte des bureaux ouverts, un environnement qui n'entraîne pas d'effets délétères pour les salariés. Elle se base notamment sur les indicateurs définis par la norme ISO 3382-3. La norme ISO 22955 traite particulièrement les bureaux au sein desquels plusieurs activités différentes cohabitent. Cependant, la démarche qui est développée par la norme profiterait d'une consolidation de ses bases scientifiques, qui sont aujourd'hui bien légères.

Les travaux de thèse ont été menés à l'INRS, en partenariat avec l'Institut National des Sciences Appliquées (INSA) de Lyon et visent à répondre aux limitations du cadre normatif de la problématique du bruit dans les bureaux ouverts évoquées ci-dessus. La thèse est divisée en quatre chapitres.

Le premier chapitre présente les deux normes utilisées lors de l'évaluation de la performance acoustique des bureaux ouverts et de la qualité acoustique de l'environnement sonore. Les méthodes d'évaluation des effets délétères du bruit sont également décrites.

Le second chapitre est consacré aux lacunes de la norme ISO 3382-3. Il décrit la procédure de mesure des indicateurs définis dans cette norme et présente une étude de leurs incertitudes. Pour cela, des expressions analytiques ont été développées et des simulations numériques ont été réalisées. Elles permettent d'évaluer l'ordre de grandeur des incertitudes de mesure et d'étudier la pertinence de la description d'un bureau à l'aide d'une valeur unique des indicateurs.

Le troisième chapitre est consacré aux limites de la démarche mise en place par la norme ISO 22955 pour évaluer la qualité acoustique des bureaux hébergeant plusieurs activités. Il présente, dans un premier temps, cette démarche afin de mettre en évidence ses limites. Ce chapitre décrit ensuite une expérience de laboratoire qui a été réalisée dans le but de corriger ces limitations.

Le dernier chapitre est consacré à une analyse critique des indicateurs de la norme ISO 3382-3 et à la proposition d'amélioration de la norme ISO 22955.

Chapitre I. État de l'art

Lorsqu'on aborde la question de la qualité acoustique d'un bureau ouvert, deux notions distinctes sont en réalité évoquées : la performance acoustique du local et la qualité de l'environnement sonore. La performance acoustique du local correspond à la capacité du local, et son aménagement, à limiter la propagation des bruits de parole. La qualité acoustique de l'environnement sonore est, elle, liée aux effets délétères du bruit auprès des personnes exposées.

Ce chapitre présente, dans un premier temps, les deux approches définies par la norme ISO 3382-3 (2022) qui permettent d'évaluer la performance acoustique des bureaux ouverts. Ensuite, les méthodes d'évaluation de la qualité d'un environnement sonore seront décrites ; une attention particulière sera portée sur les méthodes utilisées aujourd'hui sur le terrain. Enfin, la norme ISO 22955, qui définit des recommandations techniques (à l'aide d'indicateurs objectifs) pour les bureaux ouverts visant à assurer une bonne qualité de l'environnement sonore, sera présentée et la pertinence des indicateurs qu'elle utilise sera mise en évidence.

I.1. Performance acoustique du local

La problématique du bruit dans les bureaux ouverts est centrée sur les conversations intelligibles qui constituent la source de gêne la plus importante selon les personnes travaillant dans ce type d'espace [1–3]. Par ailleurs, la performance acoustique d'un local et de son aménagement correspond à leur capacité à limiter la propagation spatiale des bruits de parole. Pour caractériser cette performance, la norme ISO 3382-3 a été publiée en 2012 et une révision de celle-ci est entrée en vigueur en 2022. Cette norme, qui est une norme de mesure, définit des indicateurs permettant de caractériser la décroissance spatiale de l'intelligibilité de la parole, d'une part, et, d'autre part, du niveau pondéré A d'un bruit de parole.

I.1.1. Décroissance spatiale de l'intelligibilité

Pour caractériser la décroissance spatiale de l'intelligibilité de la parole, la norme ISO 3382-3 s'appuie sur une évaluation objective de l'intelligibilité de la parole, dont le lien avec les effets délétères du bruit de parole a été largement étudié [6].

I.1.1.1. Mesure objective de l'intelligibilité

À l'origine, l'intelligibilité de la parole était évaluée objectivement à l'aide de l'indice d'articulation (ou *Articulation Index*, AI) développé par French et Steinberg [7], qui a par la suite été amélioré par la norme ANSI S3.5 (1997) [8] en indice d'intelligibilité de la parole (ou *Speech Intelligibility Index*, SII). Cet indicateur considère que l'intelligibilité globale de la parole est la somme de la contribution à l'intelligibilité des différentes bandes fréquentielles utilisées par la parole (le nombre et la largeur des bandes fréquentielles considérées varient suivant la procédure de mesure utilisée). La contribution de chaque bande de fréquence dépend de :

- La différence entre le niveau de la parole à l'oreille de l'auditeur et le niveau d'un bruit interne, qui représente l'impact de l'ensemble des facteurs entraînant une baisse de l'intelligibilité (bruit de fond « physique », seuil de perception de l'auditeur ou encore masquage fréquentiel ayant lieu dans l'oreille).
- Un facteur de pondération, qui traduit l'importance de chaque bande fréquentielle dans l'intelligibilité globale. Ce facteur d'importance dépend du type de message pour lequel l'intelligibilité est évaluée (contenu syntaxique, sémantique, linguistique).

Steeneken et Houtgast [9,10] ont développé un autre indicateur objectif de l'intelligibilité de la parole en supposant que celle-ci dépendait de la modulation de l'enveloppe de l'intensité du signal de parole, et non pas du rapport signal sur bruit comme l'ont fait French et Steinberg. D'après eux, une parole parfaitement intelligible présente une modulation d'enveloppe égale à 1, tandis qu'une modulation d'enveloppe nulle correspond à une parole totalement inintelligible. Cet indicateur, appelé indice de transmission de la parole (ou *Speech Transmission Index*, STI), s'appuie donc sur la perte de modulation induite par la présence d'un bruit masquant, la propagation de la bouche du locuteur à l'oreille de l'auditeur (réflexions dans le local), d'éventuels phénomènes de masquage fréquentiel et du seuil de perception de l'auditeur.

La perte de modulation est évaluée pour des signaux dont l'énergie est portée dans les bandes d'octave comprises entre 125 Hz et 8000 Hz et qui sont modulés en amplitude. La procédure de mesure du STI considère les fréquences de modulations caractéristiques de la parole. Celles-ci correspondent aux fréquences centrales des 14 tiers d'octave compris entre 0,63 Hz et 12,5 Hz. La mesure du STI nécessite la

mesure de 98 facteurs de perte de modulation (7 bandes d'octave x 14 fréquences de modulations d'amplitude). Ces valeurs permettent ensuite d'évaluer le STI qui varie entre 0 (intelligibilité nulle) à 1 (intelligibilité parfaite).

Le STI est lié au score d'intelligibilité obtenu lors de tests, réalisés auprès de participants, d'intelligibilité de la parole dans le bruit. Cette relation est non-linéaire et dépend du type de message pour lequel l'intelligibilité est évaluée, comme le met en évidence la Figure I-1 qui est extraite de la norme IEC 60268-16 (2020) [11], norme qui décrit la mesure du STI.

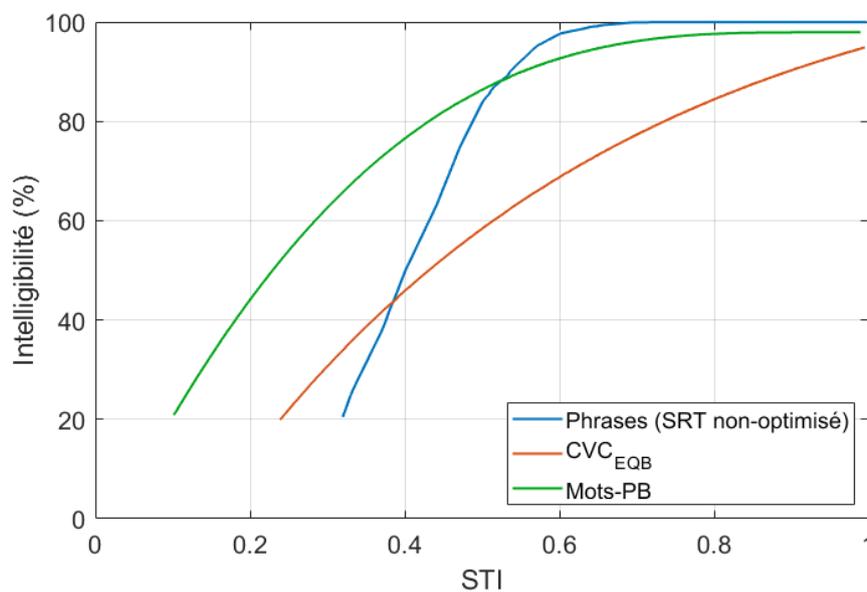


Figure I-1 : Relation entre le STI et le score d'intelligibilité pour des phrases, des syllabes de type consonne-voyelle-consonne (CVC_{EQB}) et des mots phonétiquement équilibrés (Mots-PB).
La figure est tirée de la norme IEC 60268-16 (2020) [11].

I.1.1.2. Irrelevant Speech Effect et intelligibilité

Le *Irrelevant Speech Effect* (ou ISE) est un concept introduit par Salamé et Baddeley [12] qui traduit le potentiel qu'a un bruit de parole à perturber la réalisation d'une tâche mobilisant la mémoire de travail, comme par exemple les tâches de mémoire sérielle qui consistent à retenir – puis restituer – une série de chiffres (ou de mots) qui sont présentés brièvement sur un écran. Il s'est par la suite avéré que l'ISE n'est pas exclusif aux bruits de parole. Jones et Macken [13], puis Jones *et al.* [14], ont mis en évidence que des arrangements de sons purs (de fréquences différentes) ou des bruits large bande stationnaires aléatoirement interrompus perturbent, eux

aussi, la réalisation de tâches de sériation. L'*Irrelevant Speech Effect* a donc été rebaptisé *Irrelevant Sound Effect* (également abrégé en ISE).

Jones *et al.* [15] ont cherché à expliquer l'ISE à l'aide de l'hypothèse du changement d'état (ou *Changing State Hypothesis*). Elle suppose que lors de la présentation des items (mots ou chiffres) d'une série à l'écran, des repères liés à l'ordre (*order tags*) sont associés à chacun d'entre eux. Ces repères sont alors subvocalisés (ils sont répétés mentalement). La présence du bruit peut alors perturber cette association car les deux flux d'informations sont de nature identique (l'information visuelle ayant été subvocalisée). En effet, les repères liés à l'ordre associés aux items peuvent être déplacés, ou remplacés, par d'autres repères (*order tags*) qui sont, eux, liés au bruit perturbateur. D'après l'hypothèse du changement d'état, cette interférence est d'autant plus probable que le bruit perturbateur est variable et imprévisible (un bruit continu ou qui varie lentement ne perturbe pas la tâche de sériation).

La variabilité d'un bruit de parole est intimement liée à son intelligibilité. Aussi, de nombreuses expériences de laboratoire ont étudié le lien entre l'intelligibilité de la parole et l'intensité de l'ISE. Lors de ces expériences, les sujets doivent, en général, réaliser une tâche de mémoire sérielle (utilisant des chiffres [16–23] ou des mots [24–26]) en étant exposés à différentes conditions sonores. Celles-ci sont constituées d'une voix cible masquée par différents bruits, allant du bruit pseudo-aléatoire au brouhaha constitué de nombreuses voix inintelligibles (éventuellement, une condition de contrôle – Silence – était incluse dans le protocole). Les conditions sonores sont caractérisées par une valeur de STI. Dans l'ensemble de ces études, les conditions sonores couvrent la totalité de la plage de définition du STI (entre 0 et 1).

Dans le contexte d'un test de mémoire sérielle, une bonne réponse correspond à un item (chiffre ou mot) qui a été restitué par le participant à la même position que dans la séquence d'items qui lui a été présentée. Les expériences de laboratoire évaluent la performance des participants comme la proportion de bonnes réponses de chaque participant et dans chaque condition sonore (sauf [19,25,26] qui définissent la performance comme la différence entre les proportions de bonnes et mauvaises réponses). Globalement, l'ensemble des études mettent en évidence que la performance diminue lorsque l'intelligibilité de la parole augmente.

En 2020, Haapakangas *et al.* [6] ont réalisé une revue bibliographique dans le but de mettre à jour un modèle liant l'intelligibilité de la parole au décrétement de performance lors d'une tâche de mémoire sérielle. Ce modèle avait été initialement établi en 2005 par Hongisto [27]. Pour chacune des études retenues, les auteurs ont évalué le décrétement de performance induit par le bruit à l'aide de l'équation (Eq. I-1) dans laquelle P_0 et $P(\text{STI})$ correspondent à la performance mesurée respectivement dans le silence et dans une condition sonore caractérisée par une valeur du STI. L'ensemble des points de mesure est représenté Figure I-2.

$$DP(\text{STI}) = 100 \cdot \frac{P_0 - P(\text{STI})}{P_0} \quad (\text{Eq. I-1})$$

À partir de ces mesures du décrétement de performance pour différentes valeurs de STI, Haapakangas et ses collègues ont ajusté un modèle liant ces deux grandeurs. Le modèle retenu par Haapakangas *et al.* [6] est donc une sigmoïde afin, comme l'indiquait Hongisto dans [27], d'avoir la même forme que la fonction représentative du score d'intelligibilité de phrase en fonction du STI (représentée Figure I-1). Le modèle retenu par Haapakangas *et al.* et son équation sont présentés Figure I-2 et (Eq.I-2).

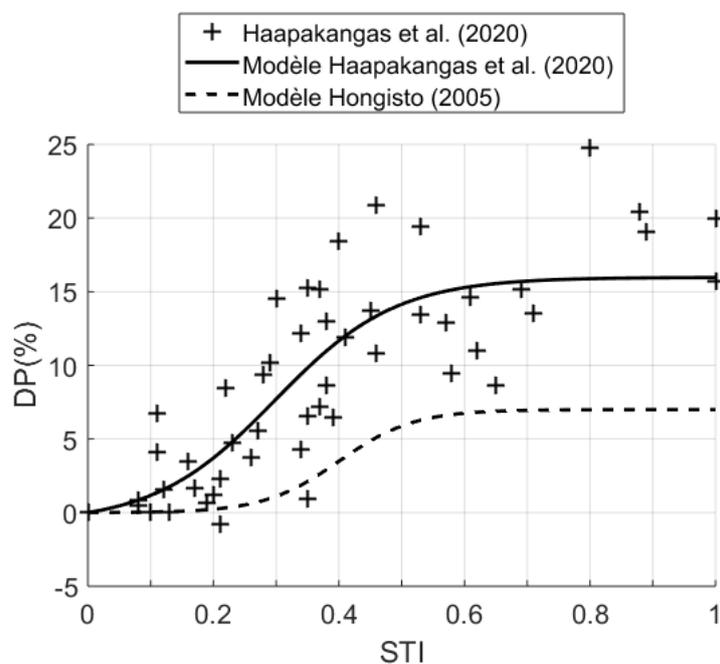


Figure I-2 : Relation entre le décrétement de performance et l'intelligibilité du bruit de parole pour une tâche de mémoire sérielle. La figure est tirée de Haapakangas *et al.* (2020).

$$DP(STI) = 16,0 - \frac{16,7}{1 + \exp\left(\frac{STI - 0,298}{0,0964}\right)} \quad (\text{Eq. I-2})$$

Sur la Figure I-2, on remarque une forte dispersion des points de mesure autour du modèle mis en avant par les auteurs. Par exemple, pour un STI supérieur à 0,8, ce qui correspond à une parole clairement intelligible, le décrétement de performance varie entre 16 % et 25 %, une différence de 9 % qui est importante si elle est comparée au décrétement de performance maximal prédit par le modèle de Haapakangas et al. ($DP(STI = 1) = 16\%$). C'est pourquoi ce modèle, et plus particulièrement sa forme sigmoïdale, a été remise en question par Kostallari *et al.* [26].

I.1.1.3. Distance de distraction

Le modèle construit par Hongisto [27], et mis à jour par Haapakangas *et al.* [6], suppose que lorsque la voix d'un locuteur est masquée par un bruit pseudo-aléatoire, le décrétement de performance qu'elle induit est maximal lorsque le STI est supérieur à 0,5. Aussi, la décroissance spatiale de l'intelligibilité est caractérisée, dans la norme ISO 3382-3, à l'aide de la distance de distraction, notée r_D . Cette distance correspond à la distance séparant un locuteur d'un auditeur, à partir de laquelle le STI, caractérisant l'intelligibilité de la parole du locuteur à l'oreille de l'auditeur, est inférieur à 0,5. La norme définit ainsi une zone circulaire (distance inférieure à r_D) autour du locuteur, à l'intérieur de laquelle la parole issue de ses conversations engendrera une gêne importante.

D'après la norme ISO 3382-3, pour évaluer la distance de distraction, une ligne de mesure doit être tracée à travers le bureau. Celle-ci doit être la plus rectiligne possible tout en reliant au moins cinq postes de travail. Une source acoustique omnidirectionnelle doit être positionnée à une extrémité de la ligne sélectionnée ; les autres postes de travail appartenant à la ligne constituent des points de mesure. À chacun d'eux, la distance à la source et le STI sont mesurés. La distance de distraction est évaluée à partir de la régression linéaire du STI en fonction de la distance, comme illustré sur la Figure I-3.

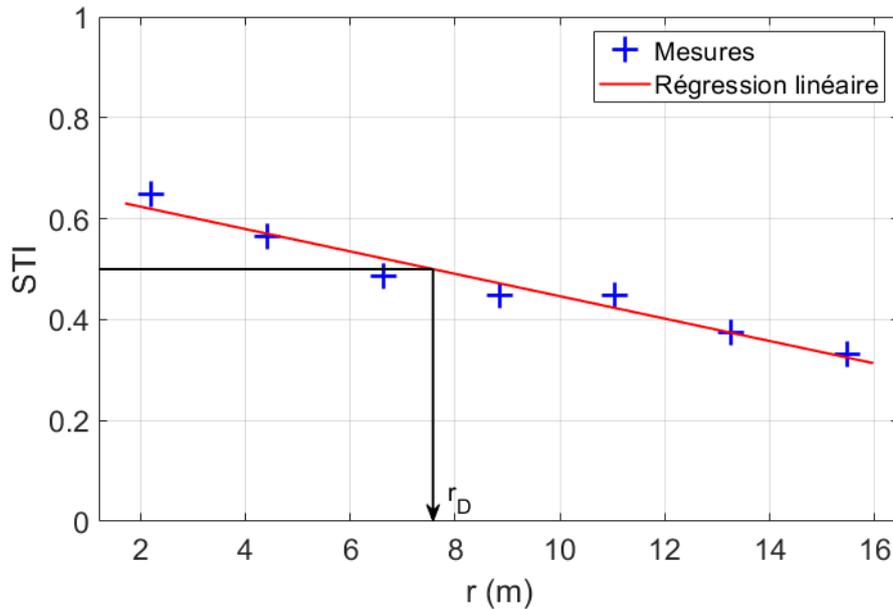


Figure I-3 : Détermination graphique de la distance de distraction r_D

La norme ISO 3382-3 prend des libertés vis-à-vis de la définition du STI donnée dans la norme IEC 60268-16 (2020). D'abord, la norme IEC 60268-16 recommande l'utilisation d'une bouche artificielle qui est une source acoustique dont la directivité est similaire à celle de la bouche humaine ; la source utilisée pour la mesure de la distance de distraction est quant à elle omnidirectionnelle. La norme ISO 3382-3 justifie ce choix par le fait que la « la direction dans laquelle parle l'occupant d'un poste de travail n'est pas toujours connue ni constante dans le temps ». La seconde liberté prise par la norme ISO 3382-3 concerne le spectre de parole utilisé pour la mesure du STI. La norme ISO 3382-3 utilise un spectre de parole issu de la norme ANSI S3.5-1997 [8] qui diffère du spectre de parole masculin utilisé par la norme IEC 60268-16. La Figure I-4 représente ces trois spectres pour un niveau global de 57,4 dB(A). Si la différence entre les spectres est faible (environ 1 dB) dans les octaves au-dessus de 500 Hz, elle atteint 5 dB pour l'octave centrée à 125 Hz. Aussi, dans le cas d'une parole masquée par un bruit de fond, la norme ISO 3382-3 aura tendance à sous-estimer la contribution à l'intelligibilité des composantes basses fréquences (125 Hz et 250 Hz) de la parole en comparaison des mesures de STI faites suivant les recommandations de la norme IEC 60268-16.

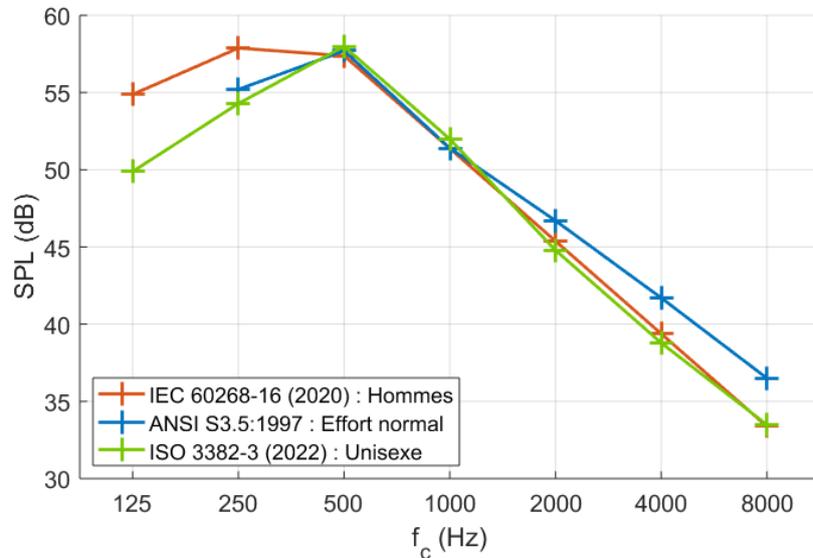


Figure I-4 : Spectres de la parole masculine (mesurée à 1 mètre en champ libre) utilisés pour la mesure du STI dans les normes IEC 60268-16 (2020) et ISO 3382-3 (2022) ou du SII dans la norme ANSI S3.5 :1997. Les spectres correspondent à un niveau global de 57,4 dB(A).

La première version de la norme ISO 3382-3, publiée en 2012 prenait une dernière liberté quant à la mesure du STI : elle indiquait que « le masquage auditif [et] le seuil auditif [...] ne sont pas inclus » dans le calcul du STI. Cette mention a été supprimée lors de la révision de la norme en 2022. Cabrera *et al.* [28] ont étudié l'impact de la prise en compte de ces deux facteurs sur la distance de distraction. Ils concluent que cette prise en compte entraîne une diminution de quelques centimètres de r_D .

I.1.2. Décroissance spatiale du niveau de la parole

La caractérisation de la décroissance spatiale du niveau pondéré A de la parole est une approche héritée de la caractérisation des locaux industriels. Dans ce domaine, la performance acoustique des locaux est évaluée notamment au travers de la propagation spatiale d'un bruit rose, qui est caractérisée par la DL_2 qui correspond à la baisse du niveau d'un bruit rose lorsque la distance à la source est doublée. Par exemple, dans un local aux murs parfaitement absorbant (propagation en champ libre) la DL_2 est égale à 6 dB. La procédure de mesure de cet indicateur est définie par la norme ISO 14257 (2002) [29]. Pour mesurer cet indicateur, une source acoustique omnidirectionnelle doit être positionnée au sol et une ligne rectiligne doit être tracée à travers le local. À différents endroits le long de cette ligne, la distance à la source ainsi que le niveau de pression acoustique sont à mesurer à 1,2 m ou 1,55 m du sol (ce qui correspond à la hauteur de la tête d'une personne assise ou debout). La DL_2

correspond alors à la pente de la régression linéaire du niveau en fonction du logarithme en base 2 de la distance.

Virjonen *et al.* [30] ont adapté cette approche à la problématique des bureaux ouverts pour proposer deux indicateurs :

- La baisse du niveau pondéré A de la parole lorsque la distance à la source est doublée, notée D_{2S} ;
- Le niveau pondéré A de la parole à quatre mètres de la source, noté L_{pAS4m} .

En pratique, la ligne de mesure traverse le bureau en reliant au moins cinq postes de travail. La source acoustique doit être positionnée à une extrémité de cette ligne, à 1,2 m de hauteur (ce qui correspond à la hauteur de la tête d'une personne assise) et émettre un bruit dont le spectre correspond à celui utilisé pour l'évaluation du STI. Chaque poste de travail appartenant à la ligne considérée constitue un point de mesure, où sont évalués la distance à la source et le niveau pondéré A de la parole. Les indicateurs D_{2S} et L_{pAS4m} sont alors évalués à partir de la régression linéaire du niveau de la parole en fonction du logarithme en base 2 de la distance à la source. D_{2S} correspond à la pente de la régression tandis que L_{pAS4m} correspond au niveau atteint par la régression pour une distance de 4 mètres depuis la source. La Figure I-5 représente la détermination graphique de ces indicateurs.

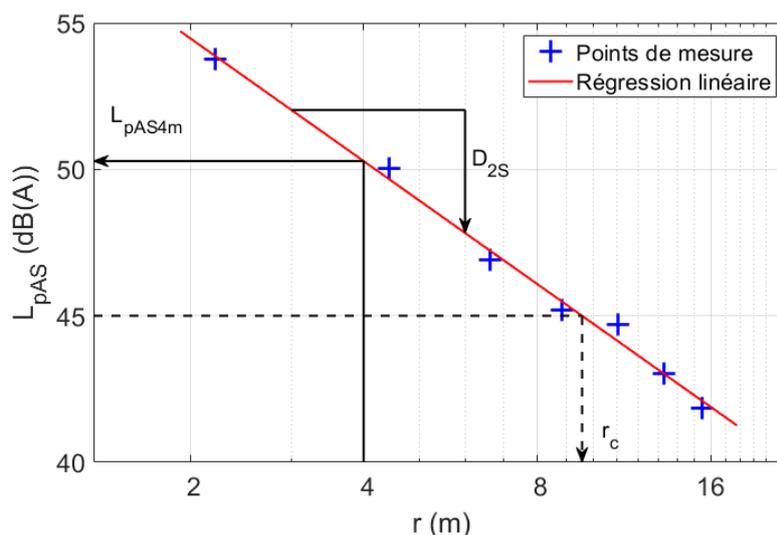


Figure I-5 : Détermination graphique de la D_{2S} , du niveau L_{pAS4m} et de la distance de confort r_c .

Virjonen *et al.* ont étudié le lien entre ces deux derniers indicateurs (D_{2S} et L_{pAS4m}) et la distance de distraction. Pour cela, les auteurs ont réalisé des mesures dans 16 bureaux différents. Les résultats ont mis en évidence une corrélation de r_D avec D_{2S} et

L_{pAS4m} , dont les coefficients sont respectivement égaux à -0,47 et 0,62. Cela est cohérent avec la signification des indicateurs : moins le niveau de la parole se propage à travers le bureau (c'est-à-dire plus D_{2S} est élevée et plus L_{pAS4m} est bas), plus l'intelligibilité de la parole décroît rapidement et donc plus r_D est faible. Virjonen et ses collègues concluent que la D_{2S} et le L_{pAS4m} peuvent être utilisés pour caractériser la performance acoustique des bureaux ouverts. Les auteurs soulignent également le fait que ces deux indicateurs sont nécessaires pour complètement caractériser la décroissance spatiale du niveau pondéré A de la parole.

Dans sa version de 2012, la norme ISO 3382-3 reprend les deux indicateurs tels qu'ils ont été définis par Virjonen *et al.* à une différence près : les indicateurs sont évalués à l'aide de points de mesure dont la distance à la source est comprise entre 4 et 24 m pour Virjonen *et al.*, mais seulement entre 2 et 16 m suivant la norme ISO 3382-3. La réduction de la distance minimale permet en particulier de prendre en compte le poste de travail voisin de celui occupé par la source acoustique lors de la mesure des indicateurs.

Contrairement à la distance de distraction, D_{2S} et L_{pAS4m} ne sont pas parlant pour des non-acousticiens. En effet, il est plus clair de dire qu'un locuteur générera une gêne importante auprès des personnes distantes de moins de r_D que de fournir les valeurs de L_{pAS4m} et D_{2S} . C'est de ce constat qu'est née l'idée de caractériser la décroissance spatiale du niveau de la parole à l'aide d'une distance. Hongisto et Keranen [31], reprenant les travaux de Nilsson et Hellström [32], ont défini la distance de confort, notée r_C . Celle-ci correspond à la distance à la source pour laquelle le niveau de la parole atteint un niveau donné, noté L_C (pour « *comfort criterion level* » bien que son lien au confort soit ténu). Les auteurs ont fixé L_C à 45 dB(A) car Veitch *et al.* [33] ont mis en évidence que, dans le cas d'une parole masquée par un bruit pseudo-aléatoire, si le niveau du bruit masquant dépasse 45 dB(A), celui-ci devient une source de gêne.

Lors de la révision de la norme ISO 3382-3 en 2022, la distance de confort a été introduite et correspond donc à la distance à la source pour laquelle le niveau de la parole atteint 45 dB(A). Elle est évaluée à partir de la régression linéaire utilisée pour l'estimation de D_{2S} et L_{pAS4m} (voir Figure I-5).

I.1.3. Lacunes de la norme ISO 3382-3

La norme ISO 3382-3 (2022) définit donc quatre indicateurs. La distance de distraction (r_D) caractérise la décroissance spatiale de l'intelligibilité de la parole. Sa définition ($STI = 0,5$) est basée sur de nombreuses expériences de laboratoire étudiant le lien entre l'intelligibilité de la parole et le décrétement de performance dans une tâche de mémoire sérielle. Le niveau pondéré A de la parole à 4 m de la source (L_{pAS4m}), le taux de décroissance spatiale de la parole (D_{2S}) et la distance de confort (r_C) caractérisent la décroissance spatiale du niveau pondéré A de la parole, approche héritée de la caractérisation des locaux industriels. Les deux approches de la norme ISO 3382-3 sont liées : si le niveau du bruit de parole décroît rapidement, ce sera également le cas de l'intelligibilité. Elles ne sont cependant pas équivalentes car la distance de distraction prend en considération le niveau du bruit de fond présent dans le bureau vide de ses occupants (à l'inverse de D_{2S} , L_{pAS4m} et r_C).

Lors de l'analyse acoustique d'un bureau, la norme ISO 3382-3 recommande de diviser le bureau en zones acoustiques dans lesquelles l'aménagement (hauteur et qualité acoustique des cloisonnettes, qualité acoustique du plafond, agencement des postes de travail) est homogène. Un bureau peut être constitué d'une unique zone acoustique. Dans chaque zone, les indicateurs doivent être mesurés au moins deux fois, idéalement suivant deux lignes de mesure distinctes et *a minima* en n'utilisant qu'une ligne de mesure mais dans les deux sens (c'est-à-dire en positionnant successivement la source à chacune des extrémités). La norme recommande le report de la moyenne des valeurs mesurées pour chacun des indicateurs dans chaque zone. Ce point est une des différences importantes entre la version initiale de la norme ISO 3382-3 (en 2012) et sa révision de 2022. En effet, suivant l'ancienne version de la norme, chaque valeur mesurée devait figurer sur le rapport de mesure. L'impact de ce changement n'est pas traité dans la norme : la dépendance des indicateurs vis-à-vis de la ligne de mesure n'a pas été étudiée.

Une lacune importante de la norme ISO 3382-3 concerne les incertitudes de mesure des indicateurs. En effet, celles-ci étaient totalement absentes de la première version publiée en 2012. Lors de la révision de la norme, des incertitudes de mesure ont été intégrées de manière simplifiée, voire insatisfaisante. En effet, la norme donne des valeurs d'incertitude pour chacun des indicateurs (par exemple, l'incertitude de D_{2S} est

fixée à 0,3 dB(A)). La norme considère que l'incertitude des indicateurs est la même dans l'ensemble des bureaux et indique des valeurs obtenues par un test de Round-Robin, évaluant la reproductibilité, réalisé dans un unique bureau très peu performant acoustiquement [34].

I.2. Qualité de l'environnement sonore

L'environnement sonore des bureaux ouverts peut avoir de nombreux effets extra-auditifs chez les personnes travaillant dans ce type d'espace. Dans le contexte de la normalisation, dont l'objectif est de protéger les salariés, la qualité d'un environnement sonore reflète non seulement la perception de celui-ci par les personnes exposées, mais aussi les effets qu'il a sur leur santé. Un environnement sonore de bonne qualité n'engendre ni gêne, ni dégradation de l'état de santé (stress, fatigue, ...) des salariés. La caractérisation de la qualité d'un environnement sonore se fait donc nécessairement au travers de l'évaluation des effets du bruit sur les personnes exposées.

En laboratoire, il est possible de mesurer de nombreuses grandeurs physiologiques durant l'exposition au bruit. On peut notamment citer le taux urinaire d'adrénaline et noradrénaline [35–37] ou la pression artérielle et la fréquence cardiaque [38,39] dont l'augmentation traduit une situation de stress pour l'organisme, et le taux salivaire de cortisol qui est lié à la fatigue [36]. Cependant, ces mesures physiologiques sont peu sensibles au bruit : les études qui ont mis en évidence un lien entre ces mesures et l'exposition au bruit considéraient une large plage de variation du niveau des environnements sonores (par exemple, Abbassi *et al.* [39] et Jahncke *et al.* [36] ont considéré des environnements dont le niveau était respectivement compris entre 55 et 85 dB(A) et entre 30 et 60 dB(A)). De plus, les protocoles impliquant ces mesures physiologiques sont lourds, nécessitent l'implication de professionnels de santé : ils sont donc, la plupart du temps, inapplicables sur le terrain. C'est pourquoi l'utilisation de questionnaires est largement répandue.

Pour évaluer la perception de l'environnement sonore, il existe de nombreux questionnaires. Par exemple, Kjellberg *et al.* [40] ont développé un indice de gêne et un indice de distraction. Le premier réalise l'évaluation de la gêne liée au bruit à l'aide

d'une échelle visuelle analogique, du nombre d'actions prises¹ contre le bruit et deux échelles de Likert qui déterminent la fréquence à laquelle le répondant pense au bruit et le nombre de problèmes de compréhension de la parole dus au bruit. Le second prend, lui, en considération la difficulté de concentration, la perception de l'effet du bruit sur la performance et le nombre de fois où le répondant a été surpris par le bruit. La même équipe de recherche s'est limitée, dans une autre étude [41], à une unique échelle visuelle analogique pour évaluer la gêne liée au bruit. Plus récemment, l'INRS et l'INSA de Lyon ont développé, dans le cadre d'un projet financé par l'ANSES, le questionnaire GABO (Gêne Acoustique en Bureau Ouvert) [3,42]. Ce questionnaire évalue, à l'aide d'échelles de Likert en 5 points, la satisfaction vis-à-vis de l'environnement de travail dans sa globalité ainsi que la perception de l'environnement sonore et la gêne qu'il induit. Le questionnaire évalue également la sensibilité au bruit des répondants et leur perception de leur santé.

Pour évaluer la fatigue perçue, il existe, également, de nombreux questionnaires. Par exemple, Jahncke *et al.* [36] ont évalué la fatigue perçue à l'aide de questions extraites du *Swedish Occupational Fatigue Inventory* [43] qui caractérise la fatigue perçue au travers de cinq dimensions (fatigue physique, inconfort physique, manque d'énergie, manque de motivation et somnolence), qui sont elles-mêmes évaluées à l'aide de cinq échelles de Likert en 11 points, tandis que Abbasi *et al.* [39] ont évalué la fatigue perçue à l'aide d'une unique échelle visuelle analogique. Le *Multidimensional Fatigue Inventory* semble être souvent utilisé pour évaluer la fatigue sur le lieu de travail et son lien avec l'exposition sonore [44–47]. Ce questionnaire a été développé par Smets *et al.* [48,49] dans le but d'évaluer la fatigue chez des patients atteints de cancer et présentant des symptômes de fatigue chronique. Ce questionnaire est constitué de 20 déclarations pour lesquelles le répondant doit indiquer si elles correspondent à son ressenti à l'aide d'une échelle de Likert en 7 points (1 : oui c'est vrai, 7 : non, ce n'est pas vrai). Le questionnaire, dans sa version française [50], évalue quatre dimensions : la fatigue générale, la fatigue mentale, la motivation et la réduction de l'activité (capacité physique de faire quelque chose).

¹ Le nombre de réponses affirmatives aux questions : Avez-vous parlé du bruit avec vos collègues ? avec votre superviseur ? au service de santé au travail ?, Utilisez-vous une protection individuelle contre le bruit ? Avez-vous demandé de tels équipements ? Avez-vous déjà changé de poste de travail à cause du bruit ?

Enfin, concernant l'évaluation de la charge mentale de travail, deux questionnaires sont majoritairement utilisés. Le questionnaire NASA-TLX [51] évalue la charge mentale au travers de six questions appréciant l'exigence mentale, l'exigence physique, l'exigence temporelle, la performance, l'effort fourni et la frustration. Ce questionnaire n'évalue que la charge mentale liée à la tâche réalisée par le répondant et ne prend pas en considération son environnement (ce qui ne pose pas de problème lors d'une expérience de laboratoire pour laquelle l'environnement est contrôlé). Le second questionnaire, développé par Galy *et al.* [52], est basé sur un modèle prenant en compte l'environnement. Le questionnaire ICA (pour Individu-Charge-Activité) évalue la charge mentale due à la tâche réalisée ainsi que celle due à l'environnement.

I.3. Objectivation de la qualité de l'environnement sonore

Dans son introduction, la norme ISO 22955 (2021) [5] indique que son objectif est de « proposer des principes, des descripteurs et des méthodes de mesure pour caractériser l'acoustique qui sont faciles à utiliser et qui correspondent à la perception de l'environnement acoustique par les occupants des espaces ». Pour atteindre cet objectif, elle dit établir « un lien entre la qualité acoustique [de l'environnement sonore] et les performances acoustiques [du bureau] ». Cette norme formalise donc une démarche qui permet d'assurer une bonne qualité acoustique de l'environnement sonore dans les bureaux ouverts.

La norme ISO 22955 (2021) considère qu'il est primordial d'identifier l'activité réalisée dans un bureau ouvert pour pouvoir en évaluer la qualité acoustique. En effet, les enjeux, et donc les traitements acoustiques nécessaires, dépendent fortement de l'activité réalisée dans le bureau. La norme définit donc six typologies de bureaux :

- Les bureaux pour lesquels l'activité est encore inconnue. Ce cas de figure est rencontré lors de la construction de nouveaux bureaux par un promoteur immobilier. Dans ce type d'espace, il s'agit de s'assurer que lors d'un aménagement ultérieur, il sera possible d'atteindre les objectifs fixés une fois l'activité identifiée. Pour cela, la norme donne des recommandations concernant la quantité d'absorbant acoustique, le niveau du bruit de ventilation ou encore l'isolement acoustique avec l'extérieur et les locaux avoisinants.

- Les bureaux dans lesquels l'activité est axée sur la communication avec l'extérieur, dont l'exemple le plus commun est le centre d'appels. Dans ce type d'espace, chaque collaborateur converse avec un interlocuteur qui n'est pas présent dans le bureau. Il s'agit, dans ce type d'espace, de s'assurer que la conversation téléphonique est intelligible et qu'elle ne perturbe pas les postes voisins. Pour cela, la norme donne des recommandations visant à minimiser la propagation des bruits de parole, tant entre postes de travail voisins qu'à travers le bureau.
- Les bureaux dans lesquels l'activité est basée sur un travail non-collaboratif. Dans ce type d'espace, il n'y a que très peu de conversations qui sont totalement inutiles à la réalisation de l'activité. Il s'agit donc de minimiser au maximum la propagation des bruits de conversations tant entre postes de travail voisins qu'à travers le bureau.
- Les bureaux dans lesquels l'activité est basée sur un travail collaboratif entre postes de travail voisins. Dans ce type d'espace, les collaborateurs sont organisés en petites équipes au sein desquelles les conversations doivent être intelligibles, mais les bruits de conversations issues d'équipes voisines sont inutiles. Pour cela, la norme donne des recommandations visant à minimiser la propagation des bruits de parole à travers le bureau, tout en la maximisant entre postes de travail voisins.
- Les bureaux dans lesquels l'activité implique l'accueil du public (tels que les zones d'accueil d'entreprise ou encore les boutiques ou espaces de ventes). Dans ce type d'espace, l'activité est très fortement liée aux discussions entre le personnel et les clients, discussions qui relèvent souvent de la vie privée du client. De plus, ce type d'espace est souvent ouvert vers l'extérieur (en particulier s'il s'agit d'une boutique). Il s'agit donc de s'assurer que la conversation entre un collaborateur et son client est facile, tout en gardant une certaine intimité vis-à-vis du reste du bureau. Pour cela, la norme fait des recommandations visant à minimiser la propagation des conversations entre postes de travail voisins ainsi que le niveau du bruit venant de l'extérieur.

- Les bureaux qui hébergent plusieurs activités au sein d'un même espace. Ces espaces sont organisés en zones dans lesquelles l'activité réalisée est identifiée. L'idée est de se rapporter aux typologies de bureaux précédentes pour chacune des zones (considérées indépendamment) et de s'assurer que chacune des activités réalisées ne perturbe pas les autres. Pour cela, la norme donne des recommandations visant à minimiser la propagation des conversations entre les différentes zones du bureau.

En plus de ces considérations spécifiques à chaque type, un enjeu acoustique est commun à l'ensemble des types dont l'activité est identifiée. Dans l'ensemble des bureaux, il est nécessaire d'avoir une bonne intelligibilité lors de conversations au poste de travail (par exemple pour joindre quelqu'un par téléphone) sans avoir besoin d'élever la voix (pour ne pas déranger les voisins). Pour assurer cela, la norme fait une recommandation sur le niveau du bruit ambiant lors d'une journée de travail.

Les recommandations concernant le niveau du bruit ambiant sont faites à l'aide du niveau de pression équivalent pondéré A (L_{Aeq}), qui doit être mesuré sur une durée supérieure à quatre heures et idéalement lorsqu'au moins 80 % des postes de travail du bureau ouvert sont occupés. Chevret *et al.* [53] ont mis en évidence, suite à une campagne de mesure au sein de 16 bureaux ouverts, une corrélation entre le L_{Aeq} et la proportion de personnes se disant fortement gênées par l'environnement sonore (coefficient de corrélation de Spearman : $r_s=0,51 - p=0,046$). Ces résultats coïncident avec ceux de Young et Moon [54] qui, en laboratoire, ont mis en évidence à l'aide d'un questionnaire qu'une augmentation du L_{Aeq} de 10 dB(A) – l'expérience considérait quatre types de bruit (brouhaha, ventilation, musique classique, bruit d'eau) présentés à quatre niveaux (35, 45, 55, 65 dB(A)) - entraînait une diminution significative du confort acoustique évalué auprès des participants.

Les recommandations concernant la propagation des bruits de parole à travers le bureau sont faites à l'aide des indicateurs D_{25} et L_{pAS4m} ¹. Haapakangas *et al.* [55] se sont basés sur une campagne de mesure liant caractérisation de la performance acoustique et de la qualité de l'environnement sonore au sein de 21 bureaux, pour

¹ La norme ISO 22955 (2021) a été publiée avant la parution de la révision de la norme ISO 3382-3 (2022) qui définit la distance de confort. C'est pourquoi la norme ISO 22955 n'utilise pas cet indicateur. On note cependant que les recommandations en termes de D_{25} et L_{pAS4m} peuvent facilement être converties en recommandations sur r_C : par exemple, les recommandations $D_{25} \geq 7$ dB(A) et $L_{pAS4m} \leq 47$ dB(A) peuvent être converties en $r_C \leq 4,9$ m.

mettre en évidence une corrélation entre L_{pAS4m} et la proportion de personnes se disant fortement gênées par l'environnement sonore ($r_s=0,47 - p<0,05$).

Si la norme ISO 22955 n'utilise pas la distance de distraction pour faire ses recommandations, c'est parce que cet indicateur encourage l'utilisation de systèmes de masquage sonore. En effet, pour diminuer r_D , deux approches sont possibles : limiter la propagation du bruit de parole ou augmenter le bruit de fond dans le bureau. Il est donc envisageable de compenser des lacunes de l'aménagement acoustique du bureau en augmentant artificiellement le bruit de fond. Les systèmes de masquage sonore sont constitués de haut-parleurs répartis dans le bureau (souvent au-dessus du faux plafond, dans le plenum) qui émettent un bruit pseudo-aléatoire stationnaire qui augmente le niveau du bruit de fond présent dans le bureau. L'efficacité de ce type de système a été prouvé en laboratoire (cf. I.1.1.2), mais celle-ci fait encore débat une fois implémenté sur le terrain [47].

La norme ISO 22955 fait également des recommandations concernant le temps de réverbération (noté Tr) dans le bureau. Si le lien entre cette durée et la perception de l'environnement sonore d'un bureau ouvert n'est pas clairement établi, on note qu'un faible temps de réverbération traduit une surface importante d'absorbants acoustiques dans le bureau, ce qui contribue à minimiser le bruit ambiant et la propagation de la parole.

La norme introduit aussi un nouvel indicateur : l'atténuation du niveau pondéré A de la parole entre deux postes de travail, noté D_{AS} . Cet indicateur est utilisé pour les recommandations concernant la propagation de la parole entre postes de travail voisins, et l'isolement des différentes activités qui cohabitent dans un même espace. Le lien entre ce nouvel indicateur et la perception de l'environnement n'a, à ce jour, pas encore été étudié.

La caractérisation d'un bureau suivant la démarche formalisée par la norme ISO 22955 peut être faite uniquement à l'aide de mesure objective de ces indicateurs (L_{Aeq} , D_{2S} , L_{pAS4m} , Tr et D_{AS}). Cependant, la norme recommande d'associer les utilisateurs à tout projet de (ré)aménagement d'un bureau. Il est en effet conseillé de réaliser une évaluation directe de la qualité acoustique de l'environnement sonore avant (afin d'identifier les faiblesses des traitements acoustiques utilisés), mais surtout

après le réaménagement. Cette évaluation directe est réalisée à l'aide de questionnaires caractérisant la perception de l'environnement sonore des répondants. Le questionnaire GABO est d'ailleurs présenté en annexe de la norme, pour être directement utilisé ou pour servir de modèle à la réalisation éventuelle d'un autre questionnaire plus spécifique.

Chapitre II. Incertitudes de mesure des indicateurs acoustiques de la norme ISO 3382-3

Les indicateurs utilisés pour la caractérisation acoustique des bureaux ouverts sont définis par la norme de mesure ISO 3382-3. Dans sa version initiale, publiée en 2012, il n'y était fait aucune mention des incertitudes de mesure, ce qui est problématique pour une norme de mesure. En effet, cette absence soulève la question de la pertinence des indicateurs : si un indicateur présente une incertitude de mesure plus grande que sa plage de variation, il est alors incapable de distinguer deux bureaux de qualités acoustiques différentes et la mesure de cet indicateur n'est d'aucune utilité. C'est en partie pour combler ces lacunes que le comité technique de l'Organisation Internationale de Normalisation en charge de la rédaction de la norme a ouvert en 2019 des discussions qui ont abouti à la publication d'une nouvelle version en 2022. Les travaux sur les incertitudes de mesure des indicateurs acoustiques réalisés lors de cette thèse s'inscrivent dans le cadre de cette révision.

Lorsque la précision d'une méthode de mesure est caractérisée, il est important de préciser dans quelles conditions elle est évaluée. En pratique, il existe deux conditions d'évaluation de la précision d'une mesure : les conditions de répétabilité et celles de reproductibilité. Lors de l'évaluation de la répétabilité, les incertitudes sont évaluées à partir de mesures répétées sur une période courte par le même opérateur qui utilise la même instrumentation. Quant à la reproductibilité, elle correspond aux incertitudes évaluées à partir de mesures réalisées par différents opérateurs utilisant un matériel de mesure différent. Les incertitudes de reproductibilité sont donc plus importantes que celles de répétabilité. Dans ce chapitre, nous cherchons à évaluer la reproductibilité de la méthode de mesure des indicateurs car ce sont ces incertitudes de mesure qui sont habituellement indiquées dans les normes de mesure.

L'objectif de ce chapitre est de réaliser une étude des incertitudes des indicateurs de la norme ISO 3382-3 et notamment d'en établir des expressions analytiques. Dans un premier temps, la procédure de mesure des indicateurs de la norme dans sa version 2022 est présentée, ainsi que la littérature scientifique associée aux incertitudes de mesure. Ensuite, des expressions analytiques des incertitudes de mesures sont développées à partir du principe de propagation des erreurs. La précision de ces expressions est alors étudiée à l'aide de simulations numériques. Enfin, la

problématique de la description d'une zone acoustique par une unique valeur des indicateurs est examinée grâce aux résultats des simulations. Les travaux présentés dans ce chapitre ont fait l'objet d'une publication scientifique [56].

II.1. La norme ISO 3382-3

II.1.1. Mesure des indicateurs

La norme ISO 3382-3 (2022) [4] définit des indicateurs qui ont été développés spécifiquement pour évaluer la qualité acoustique des bureaux ouverts. Ils caractérisent la propagation spatiale de la parole suivant deux approches. La première se concentre sur la décroissance spatiale du niveau de la parole, tandis que la seconde traite de la décroissance spatiale de l'intelligibilité de la parole, cette dernière étant évaluée objectivement à l'aide de l'indice de transmission de la parole [9–11] (ou STI pour *Speech Transmission Index*). La norme définit quatre indicateurs :

- Le taux de décroissance spatiale de la parole, noté D_{2S} , qui correspond à la baisse du niveau pondéré A de la parole lorsque la distance à la source est doublée.
- Le niveau pondéré A de la parole à 4 m de la source, noté L_{pAS4m} .
- La distance de confort, notée r_c , qui est la distance à la source pour laquelle le niveau pondéré A de la parole atteint 45 dB(A).
- La distance de distraction, notée r_D , qui est la distance à la source pour laquelle le STI atteint la valeur de 0,5.

Pour mesurer ces indicateurs, une ligne de mesure est tracée à travers le bureau ouvert. Cette ligne doit être « la plus droite possible » en passant par les postes de travail comme illustré sur la Figure II-1. Une source acoustique omnidirectionnelle est positionnée à un poste de travail à une extrémité de cette ligne et chaque poste de travail appartenant à la ligne constitue un point de mesure. La hauteur de la source et des microphones de mesure est fixée à 1,20 m, ce qui correspond à la hauteur de la tête d'une personne assise.

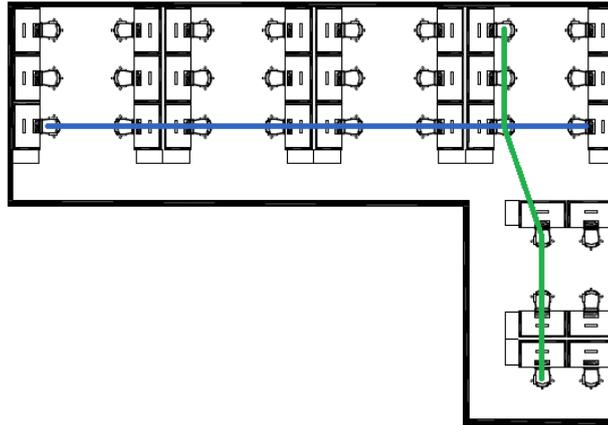


Figure II-1 : Exemples de lignes possibles pour la mesure des indicateurs acoustiques.
La figure est extraite de la norme ISO 3382-3 (2022) [4]

Dans le cas d'une ligne comprenant N points, sont mesurés :

- La distance séparant la source de chaque point, notée r_n (n désigne le point de mesure : $1 \leq n \leq N$).
- Les niveaux de pression acoustique, dans les sept bandes d'octaves dont la fréquence centrale est comprise entre 125 Hz et 8000 Hz, à chaque point de mesure, notés $L_{p,Ls,n,i}$ (i désigne la bande d'octave : $1 \leq i \leq 7$)

À partir de ces niveaux par bande d'octave, les niveaux de parole correspondants $L_{p,S,n,i}$ sont évalués à l'aide de l'équation (Eq. II-1) dans laquelle $L_{p,Ls,1m,ff,i}$ est le spectre du signal de test, mesuré à 1 m en champ libre (*free field* en anglais), émis par la source et $L_{p,S,1m,ff,i}$ est le spectre de parole mesuré dans les mêmes conditions. Ce dernier est normalisé et est renseigné dans la norme.

$$L_{p,S,n,i} = L_{p,S,ff,1m,i} - (L_{p,Ls,ff,1m,i} - L_{p,Ls,n,i}) \quad (\text{Eq. II-1})$$

Dans le cas de la caractérisation de la décroissance spatiale du niveau pondéré A de la parole, les niveaux globaux pondérés A de la parole, $L_{p,A,S,n}$, sont calculés à partir des niveaux $L_{p,S,n,i}$ à chacun des points de mesure. D_{2S} correspond à la pente de la régression linéaire du niveau pondéré A de la parole en fonction du logarithme en base 2 de la distance à la source (cette régression est déterminée avec la méthode des moindres carrés). Quant aux indicateurs L_{pAS4m} et r_c , ils désignent, respectivement, la valeur atteinte par cette régression à une distance de 4 mètres de la source et la distance pour laquelle la régression atteint 45 dB(A). La détermination graphique des

indicateurs est représentée Figure I-5 et les expressions analytiques de D_{2S} , L_{pAS4m} et r_c sont définies respectivement par (Eq. II-2), (Eq. II-3) et (Eq. II-4).

$$D_{2S} = - \frac{N \sum_{n=1}^N L_{pASn} \cdot \log_2(r_n) - \sum_{n=1}^N L_{pASn} \cdot \sum_{n=1}^N \log_2(r_n)}{N \cdot \sum_{n=1}^N \log_2(r_n)^2 - (\sum_{n=1}^N \log_2(r_n))^2} \quad (\text{Eq. II-2})$$

$$L_{p,A,S,4m} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N L_{pASn} + D_{2S} \cdot \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \log_2\left(\frac{r_n}{4}\right) \quad (\text{Eq. II-3})$$

$$r_c = 4 \cdot 2^{\frac{L_{pAS4m} - 45}{D_{2S}}} \quad (\text{Eq. II-4})$$

Dans le cas de la caractérisation de la décroissance spatiale de l'intelligibilité de la parole, il est nécessaire d'évaluer le STI à chacun des points de mesure. Pour cela, les niveaux par bande d'octave $L_{p,S,n,i}$ sont évalués de la même manière que pour l'approche précédente (Eq. II-1). Il est également nécessaire de mesurer le niveau moyen, par bande d'octave, du bruit de fond $L_{B,i}$ (causé par les équipements présents dans le bureau comme les systèmes de ventilation et de chauffage ou le niveau produit par un système de masquage éventuel) et le temps de réverbération dans chacune des octaves considérées (noté Tr_i). Les STI aux différents points de mesure (STI_n) sont alors évalués d'après la norme IEC 60269-16 (2015) [11].

Le STI est basé sur la perte de modulation, évaluée à l'oreille de l'auditeur, d'un signal de parole émis par un locuteur (la modulation du signal de parole en sortie de locuteur est égale à 1). D'après la norme IEC60268-16, cette perte de modulation doit être évaluée pour un ensemble de signaux, portés par l'ensemble des octaves comprises entre 125 et 8000 Hz ($1 \leq i \leq 7$) et modulés en amplitude suivant la fréquence F_f ($1 \leq f \leq 14$). Les fréquences de modulation considérées sont les fréquences centrales des tiers d'octave comprises entre 0,63 Hz et 12,5 Hz qui correspondent aux modulations d'amplitudes de la parole. La perte de modulation, notée $m_{n,i,f}$, d'un signal dans l'octave i et de fréquence de modulation F_f est calculée à l'aide de l'équation (Eq. II-5). Dans cette équation, $m_{1,n,i}$ traduit la perte de modulation du signal

due à la présence du bruit de fond et $m_{2,n,i,f}$ traduit la perte de modulation causée par la propagation du signal dans un local plus ou moins réverbérant¹.

$$m_{n,i,f} = m_{1,n,i} \cdot m_{2,n,i,f} = \frac{1}{1 + 10^{-\frac{L_{p,S,n,i} - L_{B,i}}{10}}} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{2\pi F_f T r_i}{13,8}\right)^2}} \quad (\text{Eq. II-5})$$

La perte par transmission $m_{n,i,f}$ est ensuite traduite, à l'aide de l'équation (Eq. II-6), en un rapport signal sur bruit effectif, noté $\text{SNR}_{\text{eff},n,i,f}$ qui est compris entre -15 dB et +15 dB. On peut remarquer qu'en l'absence de réverbération ($T r=0$), ce rapport signal sur bruit effectif est égal au rapport signal sur bruit ($L_{p,S,n,i} - L_{B,i}$).

$$\text{SNR}_{\text{eff},n,i,f} = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{m_{n,i,f}}{1 - m_{n,i,f}} \right) \in [-15; +15] \quad (\text{Eq. II-6})$$

L'indice de transmission, $\text{TI}_{n,i,f}$, d'un signal dans l'octave i et de fréquence de modulation F_f est alors calculé à l'aide de l'équation (Eq. II-7).

$$\text{TI}_{n,i,f} = \frac{\text{SNR}_{\text{eff},n,i,f} + 15}{30} \quad (\text{Eq. II-7})$$

Les indices de transmission sont ensuite moyennés dans chaque octave (Eq. II-8) pour obtenir les indices de transfert de modulation, notés $\text{MTI}_{n,i}$, qui traduisent la contribution de chaque octave à l'intelligibilité globale d'un signal de parole.

$$\text{MTI}_{n,i} = \frac{1}{14} \cdot \sum_{f=1}^{14} \text{TI}_{n,i,f} \quad (\text{Eq. II-8})$$

À partir des indices de transfert de modulation, le STI peut finalement être évalué à l'aide de l'équation (Eq. II-9). Dans cette équation, deux facteurs sont introduits :

- Les facteurs de pondération α_i qui traduisent l'importance de chaque octave vis-à-vis de l'intelligibilité de la parole.

¹ Dans sa forme complète, telle que présentée dans la norme IEC 60269-16, la perte de modulation prend également en compte le seuil de l'audition et les phénomènes de masquage fréquentiel ayant lieu dans l'oreille humaine. La norme ISO 3382-3 ne prend pas en compte ces deux aspects.

- Les facteurs de redondance (*redundancy factor*) β_i qui traduisent le fait qu'une part de l'information présente dans une octave est également présente dans les octaves voisines.

La norme ISO 3382-3 utilise les facteurs de pondération et de redondance qui correspondent à la mesure de l'intelligibilité d'une voix d'homme.

$$STI_n = \sum_{i=1}^7 \alpha_i \cdot MTI_{n,i} - \sum_{i=1}^6 \beta_i \cdot \sqrt{MTI_{n,i} \cdot MTI_{n,i+1}} \quad (\text{Eq. II-9})$$

La distance de distraction est alors évaluée à partir de la régression linéaire du STI en fonction de la distance à la source (sur une échelle linéaire). Une illustration de la détermination graphique de la distance de distraction est présentée Figure I-3 et l'expression analytique de r_D est définie par l'équation (Eq. II-10).

$$r_D = \frac{0,5 - b}{a} \text{ ou } \begin{cases} a = \frac{N \cdot \sum_{n=1}^N STI_n \cdot r_n - \sum_{n=1}^N STI_n \cdot \sum_{n=1}^N r_n}{N \cdot \sum_{n=1}^N r_n^2 - (\sum_{n=1}^N r_n)^2} \\ b = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N STI_n - a \cdot \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N r_n \end{cases} \quad (\text{Eq. II-10})$$

La norme ISO 3382-3 (2022) recommande de réaliser la mesure des indicateurs sur au moins deux lignes de mesure dans chaque zone acoustique constituant le bureau ouvert. Une zone acoustique est définie comme un espace dans lequel l'aménagement et le traitement acoustique sont homogènes. La valeur moyenne de ces différentes lignes de mesure est alors reportée dans le rapport de mesure, ce qui signifie qu'une zone acoustique est définie par une valeur unique des indicateurs.

II.1.2. Incertitudes de mesure des indicateurs

Haapakangas *et al.* [55] ont étudié, à partir de mesures et d'enquêtes réalisées au sein de 21 open-spaces, le lien entre différents indicateurs acoustiques utilisés dans les bureaux ouverts et la gêne ressentie par les salariés. Les auteurs donnent des valeurs d'incertitudes de mesure pour D_{2S} , L_{pAS4m} et r_D estimées à partir de données non publiées.

Yadav *et al.* [57] ont réalisé une étude visant à évaluer l'incertitude de mesure des indicateurs de la norme ISO 3382-3 (2012). Dans cette étude, 36 lignes de mesure ont

été utilisées et pour chacune de ces lignes, la mesure a été réalisée en positionnant la source acoustique à chacune des extrémités (les indicateurs ont été mesurés en parcourant chaque ligne dans les deux sens). Sur l'ensemble des mesures, les indicateurs étaient compris entre 2,6 et 8,7 dB(A) pour D_{2S} , entre 46,0 et 56,0 dB(A) pour L_{pAS4m} et entre 5,4 et 17,6 m pour r_D . À partir des 72 mesures réalisées (en parcourant 36 lignes de mesure dans les deux sens), les auteurs ont ajusté, pour chaque indicateur, une régression linéaire mixte permettant d'estimer les incertitudes de mesure.

Hongisto *et al.* [34] ont réalisé un test de Round-Robin auquel neuf bureaux d'études ont participé. Le bureau, dans lequel le test a été réalisé, était de qualité acoustique médiocre si on se réfère à la norme ISO 3382-3 (2022) : $D_{2S}=3,7$ dB(A), $L_{pAS4m}=52,5$ dB(A), $r_c=17,0$ m et $r_D=15,0$ m. Ce test de Round-Robin a permis d'évaluer les incertitudes de mesure des indicateurs, valeurs qui ont été reprises par la norme ISO 3382-3 lors de sa révision en 2022.

Enfin, Schneider *et al.* [58]¹ ont établi des expressions analytiques des incertitudes de mesure de D_{2S} et L_{pAS4m} . Ces expressions, développées suivant les recommandations du Bureau International des Poids et Mesures [59], prennent en considération une incertitude de la mesure des distances et des niveaux par bande d'octave, mais également une incertitude liée au choix de la ligne de mesure. Les incertitudes de D_{2S} et L_{pAS4m} ont été évaluées en appliquant ces expressions à 44 lignes pour lesquelles la D_{2S} variait de 3,0 à 8,8 dB(A) et le L_{pAS4m} de 43,5 à 54,9 dB(A).

II.2. Sources d'incertitudes

Les grandeurs de la norme ISO 3382-3 (2022) [4] sont évaluées sur une ligne de mesure tracée à travers le bureau ouvert. La norme prescrit que l'appareillage de mesure doit être placé à 1,2 m du sol à tous les postes constituant la ligne de mesure. Cette définition des positions laisse une certaine liberté à la personne réalisant la mesure quant au positionnement de l'instrumentation. Cette variabilité dans le positionnement de l'instrumentation résulte en une incertitude dans la mesure des indicateurs. En plus de cette incertitude de positionnement, il est important de prendre

¹ Ces travaux ont été réalisés au même moment, et indépendamment, des travaux présentés dans ce chapitre : [58] et [56] ont été acceptés pour publication à un mois d'intervalle.

en considération les incertitudes des grandeurs intermédiaires ($L_{p,S,n,i}$, r_n et Tr_i) permettant l'évaluation des différents indicateurs.

II.2.1. Incertitudes des intermédiaires de calcul

La distance à la source des microphones est mesurée à l'aide d'un télémètre laser ou d'un mètre ruban. L'incertitude de mesure de ces outils est de l'ordre du millimètre. Cependant, les conditions de mesure dans les bureaux ouverts sont loin d'être idéales : il y a presque toujours des obstacles (par exemple des cloisonnettes ou des écrans de PC) entre la source acoustique et les microphones. Pour cette étude, l'incertitude de mesure de la distance, notée u_r , est supposée, d'une part, être égale à 5 cm et, d'autre part, être indépendante de la distance mesurée, ce qui correspond à une erreur inférieure à 10 cm dans 95 % des cas.

Les niveaux du bruit de parole sont mesurés, comme la norme ISO 3382-3 (2022) l'exige, à l'aide d'un sonomètre ou tout autre chaîne de mesure de classe 1 répondant à la norme IEC 61672-1 (2003) [60]. Les sonomètres de classe 1 doivent respecter des limites de tolérance des incertitudes pour les niveaux de pression acoustique mesurés en tiers d'octave. À partir de ces limites de tolérance, il est possible d'estimer l'incertitude de mesure des niveaux de pression acoustique dans les bandes d'octaves concernées par les indicateurs de la norme ISO 3382-3 (2022) (ces valeurs sont indiquées dans le Tableau II-1). Étant donnée la relation (Eq. I-1), les incertitudes sur les niveaux de parole par bande d'octave (notées u_{oct}) sont égales aux incertitudes de mesure des sonomètres de classe 1 multipliées par $\sqrt{2}$ ¹ car on suppose que les niveaux de la source $L_{p,LS,ff,1m,i}$ ont été également mesurés avec un sonomètre de classe 1.

fc (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000	8000
u_{IEC} (dB(A))	0,9	0,9	0,8	0,8	0,9	1,2	1,8
u_{oct} (dB(A))	1,3	1,3	1,2	1,2	1,3	1,7	2,6

Tableau II-1 : Incertitudes des niveaux en bandes d'octave déduites de la norme IEC 61672-1 (2003) (u_{IEC}) et incertitudes des niveaux par bandes d'octave du bruit de parole (u_{oct}) utilisées pour le calcul des incertitudes des indicateurs de la norme ISO 3382-3 (2022).

¹ La différence de deux grandeurs, dont l'incertitude de mesure est égale à u , est caractérisée par une incertitude de mesure égale à $u\sqrt{2}$

Le temps de réverbération est mesuré en suivant la norme ISO 3382-2 (2008) [61]. L'incertitude de mesure du temps de réverbération est évaluée, en suivant la norme, à l'aide de l'expression (Eq. II-11). Cette expression suppose que la mesure du temps de réverbération est réalisée suivant la méthode du bruit interrompu et qu'elle a été répétée n fois dans N positions de mesure. La norme indique qu'une mesure à l'aide de la méthode de la réponse impulsionnelle intégrée revient à réaliser 10 mesures suivant la méthode du bruit interrompu (cela revient donc à multiplier n par 10 dans l'expression de l'incertitude). Dans le cadre de cette étude, on suppose que le temps de réverbération a été mesuré en une position à l'aide de la méthode de la réponse impulsionnelle intégrée ($n=10$ et $N=1$).

$$u_{Tr_i} = 0,88 \cdot Tr_i \cdot \sqrt{\frac{1 + 1,52/n}{0,71 \cdot f_{c,i} \cdot N \cdot Tr_i}} \simeq 1,12 \cdot \sqrt{\frac{Tr_i}{f_{c,i}}} \quad (\text{Eq. II-11})$$

II.2.2. Incertitudes liées au positionnement de l'instrumentation

Comme évoqué plus haut, la norme laisse quelques libertés quant au positionnement de l'appareillage de mesure. Elle précise cependant que la source et les microphones doivent être positionnés à 1,2 m du sol, ce qui correspond à la hauteur de la tête d'une personne assise à son bureau. C'est pourquoi, dans cette étude, l'erreur de positionnement verticale est négligée : on considère que l'erreur de positionnement est limitée à une erreur dans le plan horizontal.

On suppose que l'erreur de positionnement suit une loi normale bivariée et que l'appareillage de mesure est positionné dans un carré de 20 cm de côté centré sur la position idéale dans 95 % des cas. Cela revient à considérer que l'erreur de positionnement suit une loi normale bivariée de moyenne nulle et dont l'écart-type est égal à 4,5 cm. La densité de probabilité ainsi obtenue est représentée Figure II-2. Cette erreur de positionnement induit une incertitude de mesure de la distance du poste de travail à la source (notée $u_{r,pos}$) égale à 6.3 cm. Elle induit également une erreur de mesure des niveaux en bandes d'octave du bruit de parole. Cette erreur de mesure, qui est corrélée à l'erreur de positionnement, ne peut être estimée que par des mesures, au cas par cas, sur le terrain. Dans un souci de simplicité, cette erreur de

mesure des niveaux du bruit de parole est considérée comme négligeable (cette hypothèse sera étudiée plus loin dans le document).

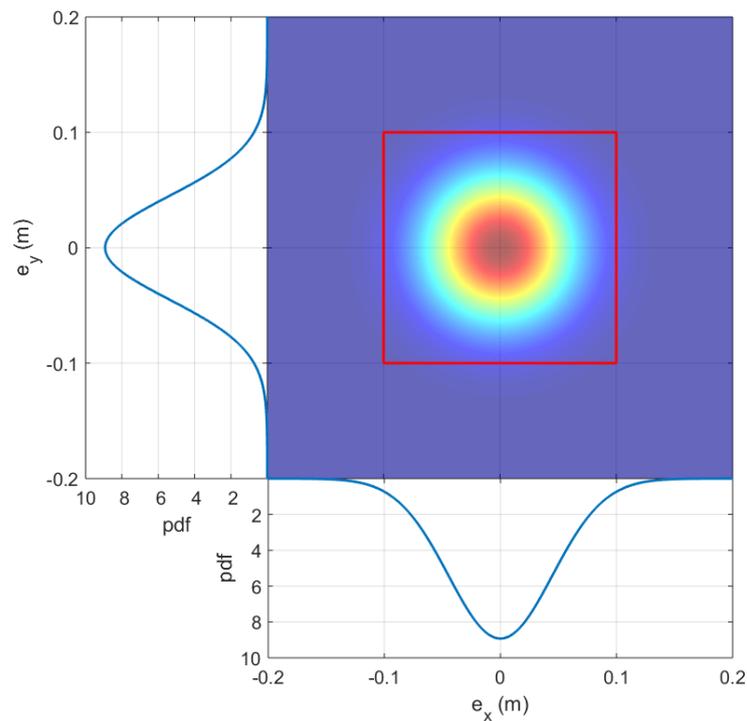


Figure II-2 : Densité de probabilité de l'erreur de positionnement de l'appareillage de mesure dans les deux directions horizontales (e_x et e_y) et représentation, dans le plan horizontal, de la densité de probabilité de l'erreur de positionnement (95 % des erreurs sont situées dans le carré rouge).

II.3. Approche analytique

Le Bureau International des Poids et Mesures a publié un guide pour l'expression des incertitudes de mesure [59]. Ce guide présente différentes méthodes permettant l'évaluation des incertitudes et en particulier le principe de la propagation des erreurs. Cette méthode permet d'évaluer les incertitudes de mesure d'une grandeur mesurée indirectement : si une grandeur Y est estimée par une fonction f , des N grandeurs intermédiaires, $\vec{X} = (X_n)_{1 \leq n \leq N}$, auxquelles sont associées les incertitudes de mesure $(u_{X_n})_{1 \leq n \leq N}$, alors l'incertitude de mesure de u_Y peut être évaluée à l'aide de l'équation (Eq. II-12). Cette expression n'est applicable que si les erreurs de mesures des grandeurs secondaires sont indépendantes, ce qui est supposé dans cette étude.

$$u_Y^2 = \sum_{n=1}^N \left(\left. \frac{\partial f}{\partial X_n} \right|_{\vec{X}} \cdot u_{X_n} \right)^2 \quad (\text{Eq. II-12})$$

Pour les indicateurs caractérisant la décroissance spatiale du niveau pondéré A de la parole (D_{2S} , L_{pAS4m} et r_c), ces intermédiaires de calcul sont les niveaux de parole en bandes d'octave $L_{p,S,n,i}$ et les distances à la source r_n de chaque point de mesure.

La première étape de l'évaluation des incertitudes de ces trois indicateurs est d'évaluer l'incertitude, à chaque point, du niveau pondéré A de la parole $L_{p,A,S,n}$. Cela est effectué en appliquant le principe de propagation de l'erreur à l'expression permettant de calculer le niveau global pondéré A à partir des niveaux en bandes d'octave, qui résulte en une relation présentée (Eq. II-13) où A_i correspond à la pondération A dans chaque bande d'octave.

$$u_{L_{p,A,S,n}}^2 = \frac{1}{(10^{L_{p,A,S,n}/10})^2} \sum_{i=1}^7 \left(10^{\frac{L_{p,S,n,i} + A_i}{10}} \cdot u_{\text{Oct},i} \right)^2 \quad (\text{Eq. II-13})$$

Il s'agit ensuite de répéter cette opération sur les expressions analytiques des indicateurs. Afin de simplifier les expressions des incertitudes de mesure de D_{2S} , L_{pAS4m} et r_c , la grandeur α_n ($1 \leq n \leq N$) est définie à chaque point de mesure par la relation (Eq. II-14).

$$\alpha_n = L_{p,A,S,n} + 2 \cdot D_{2S} \cdot \log_2(r_n) \quad (\text{Eq. II-14})$$

Les développements et calculs découlant du principe de propagation des erreurs aboutissent aux expressions (Eq. II-15), (Eq. II-16) et (Eq. II-17) qui évaluent respectivement l'incertitude de mesure de D_{2S} , L_{pAS4m} et r_c .

Pour la distance de distraction, les intermédiaires de calcul sont les niveaux de parole en bande d'octave $L_{p,S,n,i}$, la distance à la source de chaque point r_n et le temps de réverbération du bureau Tr_i , mesuré en bande d'octave.

La première étape de l'évaluation de l'incertitude de mesure de la distance de distraction est de caractériser, à chaque point de mesure, l'incertitude de mesure du STI, ce qui est réalisé en utilisant l'expression (Eq. II-18) qui a été établie en appliquant le principe de propagation des erreurs aux équation utilisées pour le calcul du STI – (Eq. II-5) à (Eq. II-9). Dans l'expression analytique de l'incertitude de mesure du STI, la grandeur $G_{n,i,f}$ est introduite pour prendre en considération la limitation du rapport signal sur bruit effectif (Eq. I-6) à l'intervalle [-15 dB, +15 dB]. La grandeur G

est égale à 0 lorsque ce rapport signal sur bruit effectif dépasse 15 dB en valeur absolue. Une fois que les incertitudes du STI ont été évaluées, l'incertitude de mesure de la distance de distraction peut être estimée à l'aide de l'expression (Eq. II-19), dans laquelle la grandeur « a » a été définie (Eq. II-10).

Le détail des développements analytiques est présenté en Annexe A. Les expressions des incertitudes de mesure obtenues à ce stade sont trop complexes pour une utilisation sur le terrain lors de la mesure des indicateurs. Aussi, une démarche de simplification de celles-ci a été mise en place et les résultats de cette simplification sont présentés dans l'Annexe B.

$$u_{D2S}^2 = \frac{\text{Cov}(\log_2(r), (\log_2(r) - \overline{\log_2(r)}) \cdot u_{L,pAS}^2) + \frac{u_r^2 + u_{r,pos}^2}{\log(2)^2} \cdot \text{Cov}(\alpha, \alpha - \bar{\alpha}/r^2)}{N \cdot \text{Var}(\log_2(r))^2} \quad \text{où } \alpha = I_{pAS} + 2 \cdot D_{2S} \cdot \log_2(r) \quad (\text{Eq. II-15})$$

$$u_{L,pAS4m}^2 = \frac{\overline{u_{L,pAS}^2}}{N} + \frac{D_{2S} \cdot (u_r^2 + u_{r,pos}^2)}{N \cdot \log(2)^2} \cdot \left(\frac{1}{r^2} + \overline{\log_2\left(\frac{r}{4}\right)} \right) \cdot u_{D,2S}^2 - \frac{2}{N} \cdot \overline{\log_2\left(\frac{r}{4}\right)} \cdot \frac{\text{Cov}(\log_2(r), u_{L,pAS}^2)}{\text{Var}(\log_2(r))} - \frac{2 \cdot D_{2S} \cdot (u_r^2 + u_{r,pos}^2)}{N \cdot \log(2)^2} \cdot \overline{\log_2\left(\frac{r}{4}\right)} \cdot \frac{\text{Cov}\left(\alpha, \frac{1}{r^2}\right)}{\text{Var}(\log_2(r))} \quad (\text{Eq. II-16})$$

$$u_{r_c}^2 = \left(\frac{\log(2) \cdot r_c}{D_{2S}} \right)^2 \cdot u_{L,pAS4m}^2 + \left(\log_2\left(\frac{r_c}{4}\right) \right)^2 - 2 \log_2\left(\frac{r_c}{4}\right) \overline{\log_2\left(\frac{r}{4}\right)} \cdot u_{D,2S}^2 + \frac{2 \cdot \text{Cov}(\log_2(r), u_{L,pAS}^2)}{N \cdot \text{Var}(\log_2(r))} + \frac{D_{2S} \cdot (u_r^2 + u_{r,pos}^2)}{\log(2)^2} \cdot \text{Cov}\left(\alpha, \frac{1}{r^2}\right) \cdot \log_2\left(\frac{r_c}{4}\right) \quad (\text{Eq. II-17})$$

$$u_{STI}^2 = \frac{1}{420^2} \sum_{i=1}^7 \left(\alpha_i - \frac{\beta_i \sqrt{MTI_{i+1}} + \beta_{i-1} \sqrt{MTI_{i-1}}}{2\sqrt{MTI_i}} \right)^2 \left[(1 - m_{1i})^2 \left(\sum_{f=1}^{14} \left(\frac{G_{if}}{1 - m_{if}} \right) \left(1 + \frac{1}{\sqrt{2N}} \right) u_{oct,i} \right)^2 + \left(\frac{10}{\log(10)} \right)^2 \left(\frac{2\pi}{13,8} \right)^4 \text{Tr}_1^2 \left(\sum_{f=1}^{14} \left(\frac{G_{if} m_{2if}^2 F_f}{1 - m_{if}} \right) u_{Tr_i} \right) \right] \quad (\text{Eq. II-18})$$

$$u_{r_D}^2 = \frac{\overline{u_{STI}^2}}{Na^2} + \frac{u_r^2 + u_{r,pos}^2}{N} + 2 \frac{r_D - \bar{r}}{Na^2} \cdot \frac{\text{Cov}(r, u_{STI}^2)}{\text{Var}(r)} + \left(\frac{r_D - \bar{r}}{a} \right)^2 \frac{\text{Cov}(r, (r - \bar{r}) \cdot u_{STI}^2) + (u_r^2 + u_{r,pos}^2) \cdot \text{Var}(STI)}{N \cdot \text{Var}(r)^2} \quad (\text{Eq. II-19})$$

II.4. Approche numérique

Les expressions analytiques des incertitudes sont basées sur la linéarisation des équations qui définissent ces indicateurs. Il est donc nécessaire d'en évaluer la précision. Dans ce but, une série de simulations a été réalisée à l'aide du logiciel RayPlus v8.1.0. Ce logiciel, développé par l'INRS, est basé sur la méthode des rayons et prend en considération la réflexion par les surfaces, la perte par transmission à travers des surfaces et la diffraction par les arêtes [62–64]. Le logiciel réalise les calculs dans les bandes d'octaves qui nous intéressent ici, c'est-à-dire celles dont la fréquence centrale est comprise entre 125 Hz et 8000 Hz. Dans les simulations, les sources acoustiques sont des sources ponctuelles parfaitement omnidirectionnelles et les récepteurs acoustiques (microphones) sont des cellules sphériques de 5 cm de diamètre. Étant donné la taille de ces cellules et les dimensions du bureau simulé (qui est présenté ci-après), il est nécessaire de tirer 12 millions de rayons à partir de chaque source pour que les niveaux calculés convergent.

L'acoustique géométrique, à laquelle appartient la méthode des rayons, a parfois tendance à manquer de précision. Cette limitation est particulièrement importante lorsque :

- L'analyse est réalisée dans des bandes fréquentielles fines [64–66] et dans le domaine des basses fréquences [64,65,67].
- Le local considéré est fortement réverbérant [68].
- Les dimensions du local sont fortement disproportionnées, faisant de celui-ci un guide d'ondes [68].

Le local considéré est un bureau ouvert, type d'espace qui ne peut être considéré comme fortement réverbérant, même lorsqu'il est de mauvaise qualité acoustique. L'analyse est réalisée en bandes d'octave dont la fréquence centrale est supérieure à 125 Hz. De plus, une attention particulière a été portée aux dimensions du local afin qu'il ne puisse pas être considéré comme un guide d'ondes. Dans ces conditions, les limitations de l'acoustique géométrique n'ont pas de conséquences importantes sur les résultats des simulations.

II.4.1. Le bureau simulé

Le bureau ouvert simulé est un local de 115 m² (13,6 x 8,5 m x 2,7 m) qui accueille 32 postes de travail. Les deux murs latéraux sont vitrés sur toute leur longueur. L'aménagement retenu pour les simulations, dont le plan est représenté Figure II-3, est très simple : deux rangés, de chaque côté d'une allée, de quatre groupes de quatre bureaux. Cet aménagement est typique des centres d'appels, dans lesquels l'activité est réalisée essentiellement par téléphone et ne nécessite pas de communication entre les personnes voisines dans le bureau. Aussi, des cloisonnettes acoustiques sont installées entre les postes de travail se faisant face (en rouge sur la Figure II-3). L'aménagement est régulier dans tout le bureau. Il constitue donc une unique zone acoustique d'après la norme ISO 3382-3 (2022).

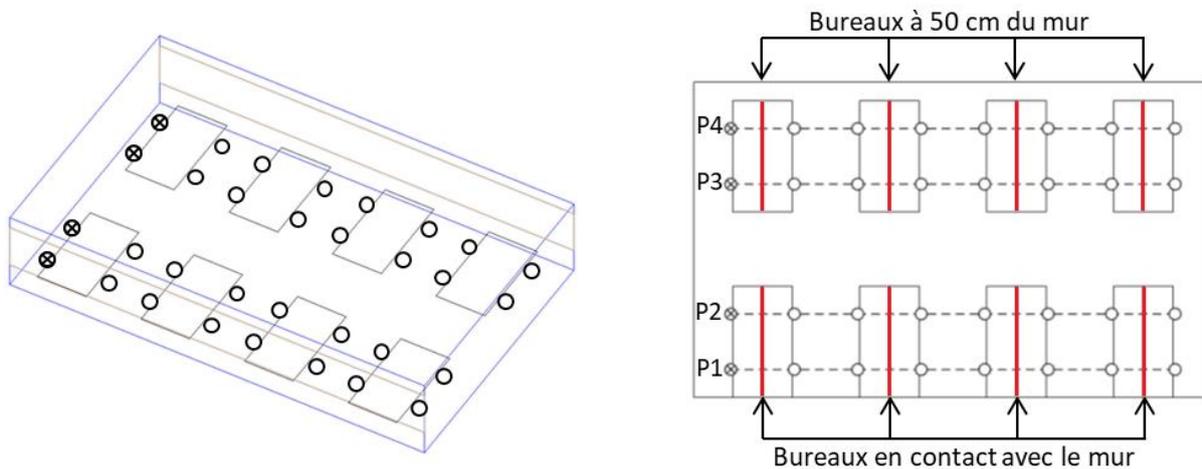


Figure II-3 : Plan du bureau simulé dans RayPlus. En rouge sont représentées les cloisonnettes acoustiques. Les quatre lignes de mesure P1-P4 sont représentées par les lignes pointillées. Les cercles représentent les positions des microphones et les croix cerclées marquent les positions des sources acoustiques. Les cloisonnettes acoustiques sont représentées en rouge sur le plan en 2D du bureau.

L'aménagement du bureau permet de définir quatre lignes de mesure, numérotées P1 à P4 sur la Figure II-3. P1, P2 et P3 respectent les exigences de la norme ISO 3382-3 (2022), à savoir que l'appareillage de mesure est positionné à plus d'un mètre des murs et autres surfaces réfléchissantes. P1 n'est, quant à lui, qu'à 0,8 m du mur latéral mais a été conservée car c'est un cas de figure couramment rencontré en pratique.

L'aménagement du bureau a été dérivé en 16 configurations acoustiques en variant la qualité acoustique du plafond et des cloisonnettes, ainsi que la hauteur de celles-ci. Pour le plafond, deux qualités acoustiques ont été considérées. Elles correspondent

aux exigences les plus basses pour un matériau de classe A ($\alpha_w=0,9$) et de classe C ($\alpha_w=0,6$) selon la norme ISO 11654 (1997) [69]. Quatre hauteurs de cloisonnettes ont été considérées : 190 cm, 150 cm, 130 cm et 110 cm. Pour chaque hauteur, les mêmes qualités acoustiques que pour le plafond ont été considérées pour les cloisonnettes. Le plafond est caractérisé par un coefficient d'absorption dans chaque octave tandis que les cloisonnettes sont caractérisées par ce même coefficient d'absorption et une perte par transmission. Ces caractéristiques acoustiques sont présentées Figure II-4.

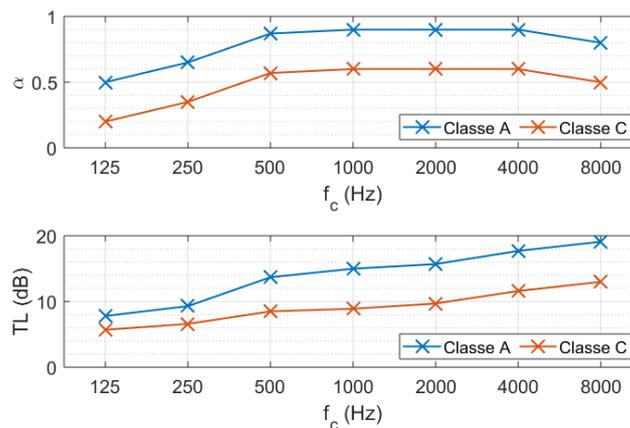


Figure II-4 : Caractéristiques acoustiques du plafond et des cloisonnettes (α : coefficient d'absorption, TL : perte par transmission)

II.4.2. Description de la méthode

L'approche numérique d'évaluation des incertitudes de mesure est basée sur la méthode de Monte-Carlo décrite par le Bureau International des Poids et Mesures [70]. Cette méthode consiste en l'émulation de la répétition de la mesure des indicateurs en réalisant un tirage aléatoire des différentes erreurs de mesure. Comme indiquée en II.2, les erreurs considérées dans cette étude sont les erreurs de positionnement de l'appareillage de mesure (sources acoustiques et microphones) et les erreurs intrinsèques à la mesure de distance et de niveaux de pression acoustique.

Dans le but d'émuler une erreur de positionnement de l'appareillage de mesure, chaque position de la source acoustique et des microphones a été remplacée, dans les simulations, par neuf sources ou cellules (croix bleues sur la Figure II-5) positionnées sur une grille 3x3 de 20 cm de côté centrée sur la position idéale de l'appareillage (cercle rouge sur la Figure II-5). Pour chaque ligne de mesure, la

simulation calcule les niveaux par bande d'octave pour chaque couple {source, récepteur} à chaque point.

La première étape de l'approche de Monte-Carlo consiste à réaliser le tirage des erreurs de positionnement de l'ensemble des appareils de mesure (étape 1.a sur la Figure II-5). Cette erreur suit une loi normale bivariée, dont les caractéristiques ont été décrites en II.2.2. Les niveaux mesurés pour les positions (avec erreurs de positionnement) de l'instrumentation sont interpolés à partir des résultats de la simulation (étape 1.b sur la Figure II-5). À ce stade, les erreurs de mesure de l'appareillage n'ont pas encore été prises en compte. Cela correspond donc à la mesure des indicateurs avec une instrumentation parfaite.

La seconde étape de l'approche de Monte-Carlo est donc de prendre en compte les erreurs de mesure de l'instrumentation en réalisant un tirage aléatoire de ces erreurs (étape 2.a sur la Figure II-5). Les erreurs de mesure de distance suivent une loi normale centrée de variance égale à $0,05^2$ (d'après l'hypothèse faite en II.2.1). Les erreurs de mesure des niveaux en bandes d'octave suivent, elles, une loi uniforme sur l'intervalle $[-u_{\text{oct}}\sqrt{3}; u_{\text{oct}}\sqrt{3}]$, comme il est d'usage lorsque l'incertitude de mesure est liée à des limites de tolérance¹. Enfin, dans le cas de l'évaluation de l'incertitude de la distance de distraction r_D , l'erreur de mesure du temps de réverbération est également tirée aléatoirement et suit une loi normale centrée dont l'écart-type est évaluée à l'aide de l'équation (Eq. II-11). Ces erreurs de mesure sont alors ajoutées aux résultats de la première étape, afin d'obtenir l'émulation d'une mesure des indicateurs prenant en considération l'ensemble des erreurs considérées (étape 2.b sur la Figure II-5).

¹ Lorsque la valeur de l'incertitude de mesure u est issue de limites de tolérance, comme c'est le cas ici, il est d'usage de considérer que l'erreur de mesure suit une loi uniforme sur l'intervalle $[-u\sqrt{3}; u\sqrt{3}]$, ce qui correspond à une variance de l'erreur de mesure égale à u^2 , et donc à une incertitude égale à u .

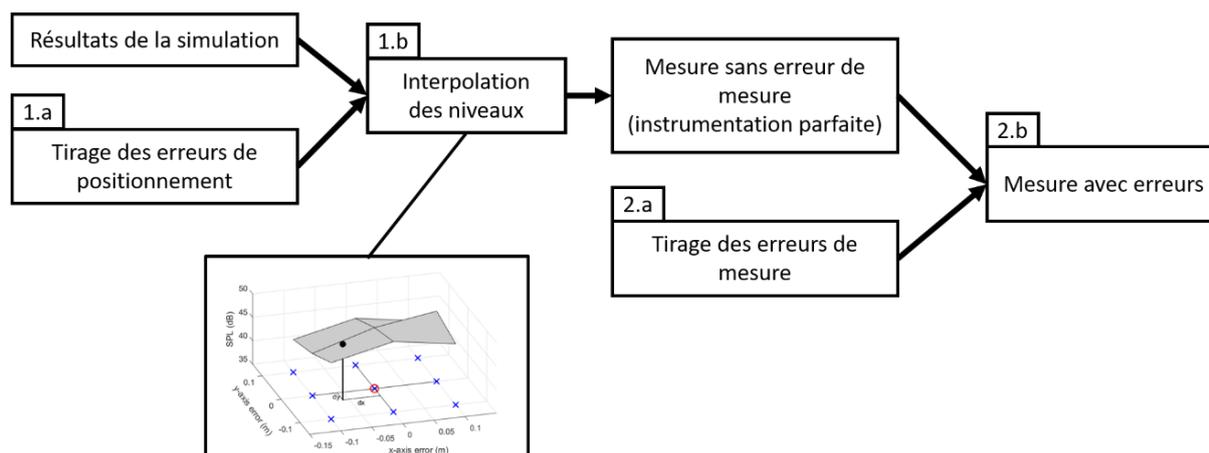


Figure II-5 : Schéma de principe de l'approche numérique.

Ce processus est répété plusieurs fois, simulant plusieurs mesures des indicateurs sur chaque ligne. Le nombre de répétitions a été graduellement augmenté jusqu'à convergence des résultats, c'est-à-dire jusqu'à ce que deux simulations successives donnent des incertitudes identiques à 0,01 dB(A) près pour D_{2S} et L_{pAS4m} et à 0,01 m près pour r_c et r_D . Ce critère de convergence atteint pour 10 000 répétitions.

II.4.3. Résultats

La Figure II-6 représente la répartition des valeurs atteintes par les indicateurs sur les quatre lignes de mesure pour l'ensemble des 16 configurations acoustiques du bureau simulé. D_{2S} varie entre 3,3 et 8,9 dB(A), L_{pAS4m} entre 38,9 et 53,1 dB(A), r_c entre 1,9 et 22,8 m et r_D entre 1,9 et 19,5 dB(A). Les différentes configurations acoustiques couvrent donc une large variété de qualités acoustiques des bureaux ouverts. Si l'on se réfère à la norme allemande VDI 2569 (2019) [71] qui est la seule à fournir une classification des bureaux ouverts en fonction de ces indicateurs, les configurations acoustiques ont des caractérisations allant de non-classifiées (mauvaise qualité acoustique : $D_{2S} \leq 4$ dB(A) et $L_{pAS4m} > 51$ dB(A)) à classe B (bonne qualité acoustique pour un travail administratif, qualité acceptable pour un centre d'appels : $D_{2S} \geq 8$ dB(A) et $L_{pAS4m} \leq 47$ dB(A)).

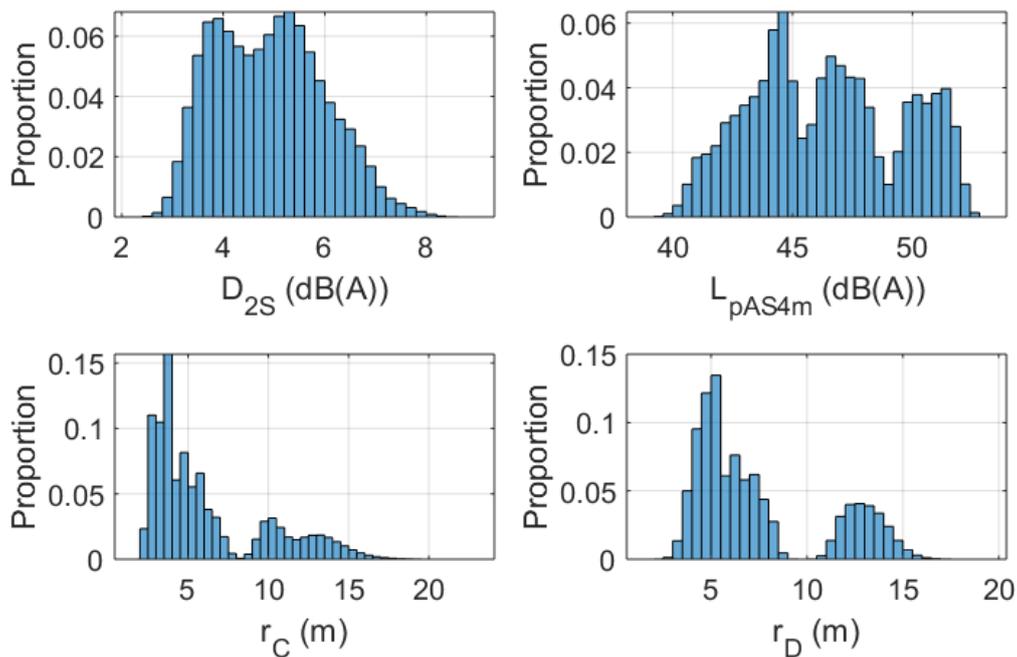


Figure II-6 : Répartition des indicateurs pour l'ensemble des configurations acoustiques du bureau

II.5. Incertitudes de mesure pour le cas d'étude

Les valeurs des incertitudes de mesure évaluées à l'aide de l'approche numérique sont présentées Figure II-7. Il apparaît que l'incertitude de mesure de la D_{2S} ne varie que très peu sur l'ensemble des configurations acoustiques et prend des valeurs comprises entre 0,30 et 0,36 dB(A). Concernant l'incertitude de mesure du L_{pAS4m} , deux comportements semblent se dessiner : pour les lignes P2 et P3, l'incertitude ne dépend que très peu de la configuration acoustique tandis que pour les lignes P1 et P4, elle augmente lorsque la qualité acoustique du bureau s'améliore (dans le cas d'étude, l'amélioration de la qualité acoustique s'accompagne d'un « enfermement » des sources acoustiques des lignes P1 et P4 par l'aménagement du bureau). Dans tous les cas, l'incertitude de mesure du L_{pAS4m} varie entre 0,32 et 0,52 dB(A). L'incertitude de mesure de r_C varie entre 0,14 et 1,45 m et celle de r_D varie entre 0,17 et 0,9 m. Ces incertitudes des distances de confort et de distraction peuvent paraître importantes dans certains cas mais :

- Lorsque les cloisonnettes mesurent 130 cm ou plus, elles sont de l'ordre de 20 cm, ce qui représente à peu près la dimension de la tête d'une personne.
- Lorsque les cloisonnettes mesurent 110 cm, les incertitudes augmentent fortement, mais, dans ces conditions, r_D et r_C dépassent la dizaine de mètres et sont parfois plus importantes que la dimension du bureau.

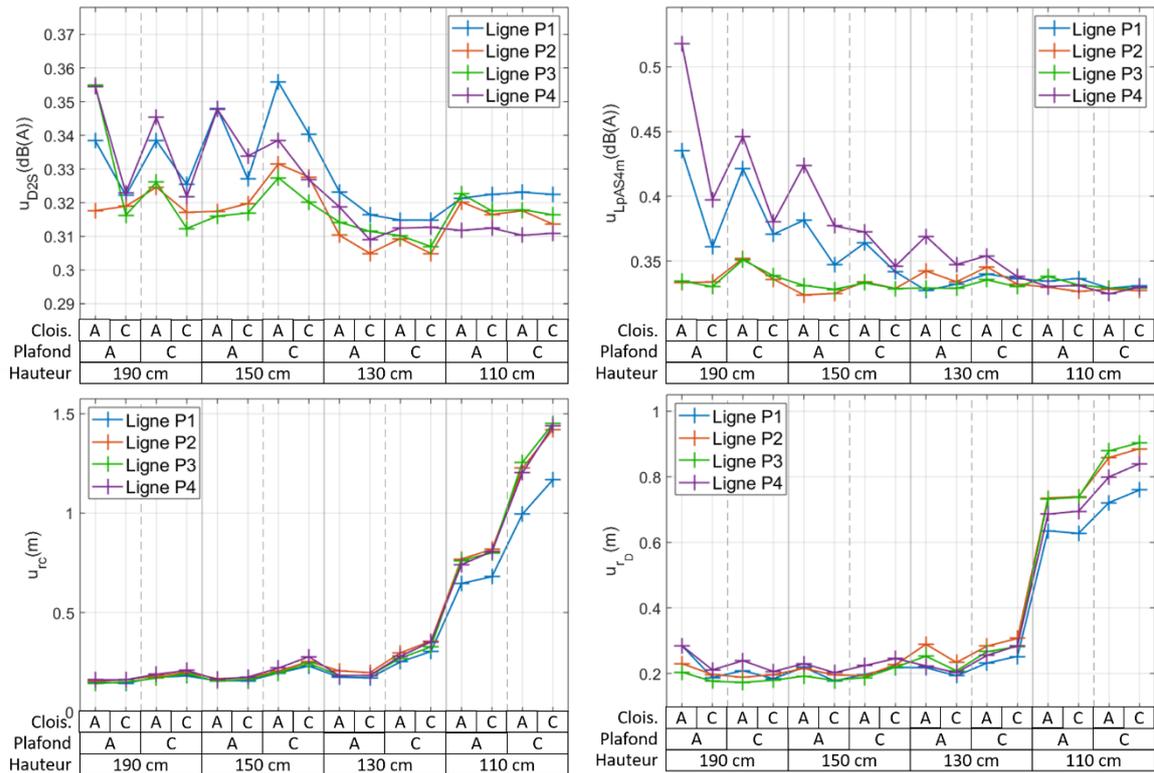


Figure II-7 : Incertitudes estimées pour chaque ligne de mesure dans chaque configuration.

Les extremums des incertitudes de mesure (arrondies au dixième supérieur, comme il est d'usage) sont présentés dans le Tableau II-2 et sont accompagnés de valeurs issues de la littérature et décrites dans la partie II.1.2. Étant donné que les résultats de l'approche analytique laissent supposer que les incertitudes dépendent fortement du nombre de points de mesure sur la ligne, les simulations ont également été réalisées en ne considérant que les cinq postes de travail les plus proches de la source sur chaque ligne (au lieu de la ligne complète constituée de 7 points) afin de faciliter la comparaison avec les valeurs données par Hongisto *et al.* [34].

	Simulations		Haapakangas [55]	Yadav [57]	Hongisto [34]
	16 config. x 4 lignes		Inconnu	36 lignes dans 27 bureaux	2 config. x 2 lignes
N	7	5	Inconnu	5-8	5
U_{D2S} dB(A)	0,4	0,4-0,5	1,0	0,61	0,2-0,5
U_{LpAS4m} dB(A)	0,4-0,6	0,4-0,7	1,5	1,04	0,9-1,3
U_{rc} m	0,2-1,5	0,2-2,2	-	-	2,4-5,5
U_{rD} m	0,2-1,0	0,2-1,1	-	0,90	1,2-2,7

Tableau II-2 : Comparaison des résultats des simulations à la littérature

(Les plages données pour les simulations et Hongisto et al. correspondent aux extrémums obtenus dans les cas étudiés)

Étant donné que les valeurs d'incertitudes données par Haapakangas *et al.* [55] ont été obtenues à partir de données non-publiées, seule la comparaison des ordres de grandeur est pertinente. Les incertitudes obtenues par l'approche numérique sont environ deux fois plus petites que celles données par Haapakangas *et al.*

Yadav et ses collègues [57] ont évalué les incertitudes de D_{2S} , L_{pAS4m} et r_D à partir de 36 lignes. Ces lignes étaient constituées de 5 à 8 points. La mesure des indicateurs a été réalisée en parcourant chaque ligne dans les deux sens et les incertitudes ont été évaluées à partir de cet ensemble de mesures. Globalement, D_{2S} variait entre 3,2 et 8,5 dB(A), L_{pAS4m} entre 46,1 et 55,6 dB(A) et r_D entre 5,1 et 17,6 m. Les auteurs ont reporté une incertitude de 0,61 dB(A) pour D_{2S} , 1,04 pour L_{pAS4m} et 0,90 m pour r_D . Les valeurs prises par les indicateurs sont proches de 9 de nos configurations simulées :

- Le plafond de classe C et les cloisonnettes de classe C d'une hauteur de 190 cm,
- Le plafond de classe A ou C, les cloisonnettes de classe C d'une hauteur de 150 cm (ce qui fait 2 configurations),
- Le plafond de classe A ou C, les cloisonnettes de classe C d'une hauteur de 130 cm (ce qui fait 2 configurations),
- Le plafond de classe A ou C, les cloisonnettes de classe A ou C et les cloisonnettes d'une hauteur de 110 cm (ce qui fait un total de 4 configurations).

Pour toutes ces configurations, et en considérant 5 ou 7 points de mesure par ligne, les simulations estiment une incertitude comprise entre 0,4 et 0,5 dB(A) pour D_{2S} et L_{pAS4m} et entre 0,2 et 1,1 m pour r_D . Les valeurs obtenues pour la D_{2S} et le r_D sont très

proches des incertitudes données par Yadav *et al.*, mais l'incertitude de L_{pAS4m} issue des simulations est deux fois plus faible que la valeur donnée par les auteurs.

Hongisto *et al.* [34] ont réalisé un test de Round-Robin en considérant 2 lignes de mesure, constituées de 5 points chacune, dans un open-space ayant deux configurations (la hauteur des bureaux et des cloisonnettes était ajustable). Globalement, les indicateurs ne dépendaient pas de la configuration choisie et leur valeur était estimée à 3,8 dB(A), 52,5 dB(A), 17 m et 15 m pour D_{2S} , L_{pAS4m} , r_c et r_D respectivement. Les incertitudes associées à ces mesures étaient comprises entre 0,2 et 0,5 dB(A) pour $u_{D_{2S}}$, entre 0,9 et 1,3 pour $u_{L_{pAS4m}}$, entre 2,4 et 5,5 m pour u_{r_c} et entre 1,2 et 2,7 m pour u_{r_D} . Les valeurs des indicateurs obtenues par Hongisto sont proches de la plus mauvaise de nos configurations : le plafond de classe C et les cloisonnettes de classe C et d'une hauteur de 110 cm. Dans cette configuration, et avec des lignes de mesure à 5 points, les simulations résultent en une incertitude de 0,5 dB(A) pour D_{2S} et L_{pAS4m} et une incertitude comprise entre 1,4 et 2,2 m pour r_c et entre 0,9 et 1,1 pour r_D . Ces résultats sont encore une fois très proches des incertitudes obtenues par Hongisto *et al.*, exceptée l'incertitude de mesure de L_{pAS4m} qui est de nouveau sous-estimée d'un facteur 2.

Pour résumer, les incertitudes de mesure de D_{2S} , r_c et r_D estimées par les simulations sont proches de celles présentées dans la littérature et en particulier de celles obtenues par le test de Round-Robin de Hongisto *et al.* [34]. Les incertitudes de mesure du L_{pAS4m} semblent, quant à elles, être sous estimées (bien que du même ordre de grandeur), ce qui peut s'expliquer par le fait que les simulations ne prennent pas en compte toutes les sources d'erreurs de mesure des indicateurs. Par exemple, dans les simulations, les sources acoustiques sont parfaitement stationnaires, ce qui n'est pas le cas des sources réelles. Il est possible que ces variations temporelles du niveau émis fassent varier globalement les niveaux de parole mesurés ce qui entrainerait des variations du L_{pAS4m} sans impacter la précision de la mesure de D_{2S} (une augmentation globale des niveaux de parole entraîne une augmentation du L_{pAS4m} , mais pas de variation de D_{2S}).

II.6. Comparaison avec les expressions analytiques

Les expressions analytiques de l'incertitude de mesure des différents indicateurs, développées en II.3, sont issues d'expressions linéarisées. La validité et la précision

de ces expressions doivent donc être étudiées. Dans ce but, les expressions analytiques ont été utilisées pour évaluer les incertitudes de mesure du cas d'étude. Les équations (Eq. II-15), (Eq. II-16), (Eq. II-17) et (Eq. II-19) ont donc été appliquées en considérant les « mesures » sans erreur (de positionnement de l'instrumentation ou de mesure des niveaux et distances) des 16 configurations acoustiques simulées. Les valeurs d'incertitudes ainsi obtenues ont été comparées aux incertitudes évaluées numériquement. La Figure II-8 représente, pour chacune des 64 lignes simulées (4 lignes x 16 configurations), la valeur de l'incertitude estimée avec les expressions analytiques en fonction de celle estimée avec la méthode de Monte-Carlo (qui servent ici de références). Sur cette figure, sont représentées les valeurs estimées (croix bleues) ainsi que les valeurs arrondies au dixième supérieur (cercles rouges).

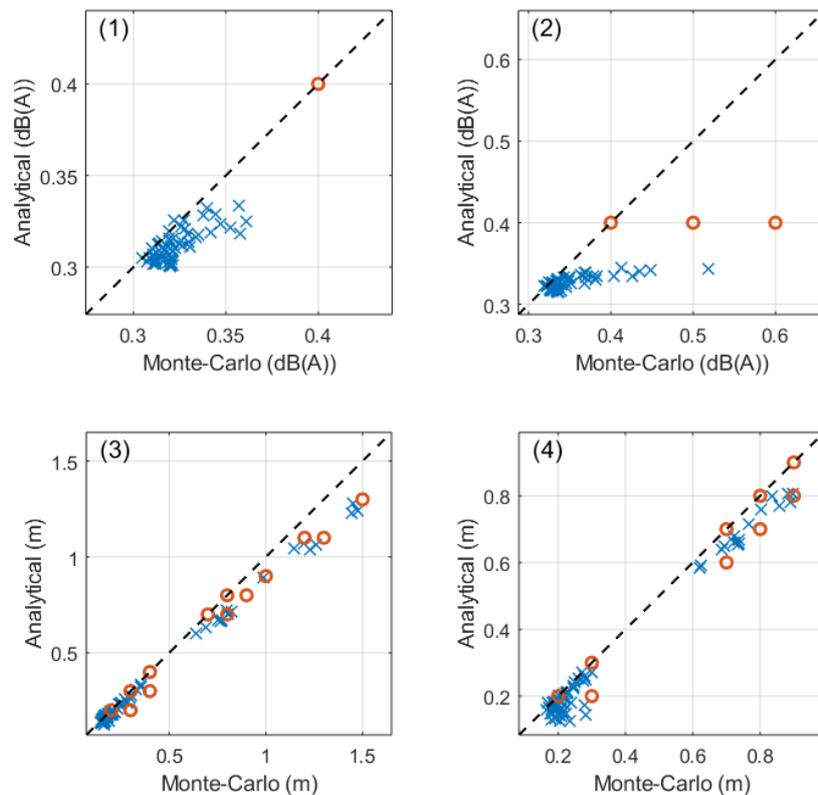


Figure II-8 : Incertitudes de mesure évaluées à l'aide des expressions analytiques en fonction des valeurs obtenues par la simulation pour D_{25} (1), L_{pAS4m} (2), r_c (3) et r_D (4).
(valeurs exactes : croix bleues, valeurs arrondies au dixième supérieur : cercles rouges)

La Figure II-8 met en évidence que la précision des expressions analytiques est bonne :

- Pour D_{2S} : les deux approches donnent les mêmes valeurs d'incertitude au dixième près.
- Pour r_c : les deux approches donnent des valeurs d'incertitude qui diffèrent de moins de 0,2 m. Ce maximum de l'erreur d'estimation est atteint pour les configurations dans lesquelles la distance de confort atteint une quinzaine de mètres.
- Pour r_D : les deux approches donnent des valeurs d'incertitude qui diffèrent de moins de 0,1 m.

L'expression analytique de l'incertitude de mesure du L_{pAS4m} est précise dans la grande majorité des cas : une erreur d'estimation de l'incertitude significative n'apparaît que pour 5 lignes de mesure sur les 64 considérées : les lignes P1 et P4 avec des cloisonnettes de classe A mesurant 190 cm ou 150 cm et la ligne P4 lorsque le plafond et les cloisonnettes sont de classe A et que celles-ci mesurent 130 cm. Ces lignes de mesure sont les cas dans lesquelles les sources acoustiques sont particulièrement « enfermées » acoustiquement : elles sont entourées de grandes cloisonnettes dans un coin du bureau.

Rappelons que lors du développement des expressions analytiques, il a été supposé que l'erreur de positionnement de l'appareillage de mesure n'entraîne pas d'erreur des niveaux par bandes d'octave de la parole. Or, lorsque la source est « enfermée », une petite différence de positionnement peut entraîner une modification importante du champ de pression dans le bureau et donc une erreur dans l'évaluation des niveaux.

La Figure II-9 met cela en image. Elle représente la différence entre les champs de pression acoustique pour deux positions de la source (notées S4 et S4') de la ligne P4 dans la configuration pour laquelle le plafond est de classe A et les cloisonnettes sont de classe A et mesurent 190 cm. Sur cette figure, les zones rouges correspondent aux zones pour lesquelles la source S4 induit un niveau plus important que la source S4' (et inversement pour les zones bleues). On observe, sur cette cartographie, une zone rouge (presque continue) qui trace un « W » à travers le bureau. Cette zone indique l'existence d'un chemin de propagation pour la source S4 et qui n'existe pas pour la source S4'. Ce chemin correspond aux réflexions successives sur les vitres des murs latéraux du bureau. Ce chemin de propagation entraîne de fortes variations des niveaux autour des positions de mesure 3 et 4 (jusqu'à 4 dB) comme le montre la

Figure II-9 (bas) qui est, en quelque sorte un plan de coupe de la cartographie le long de la ligne de mesure P4. Il est donc clair dans ce cas que l'erreur de positionnement de la source entraîne des variations de niveaux autour des points de mesure.

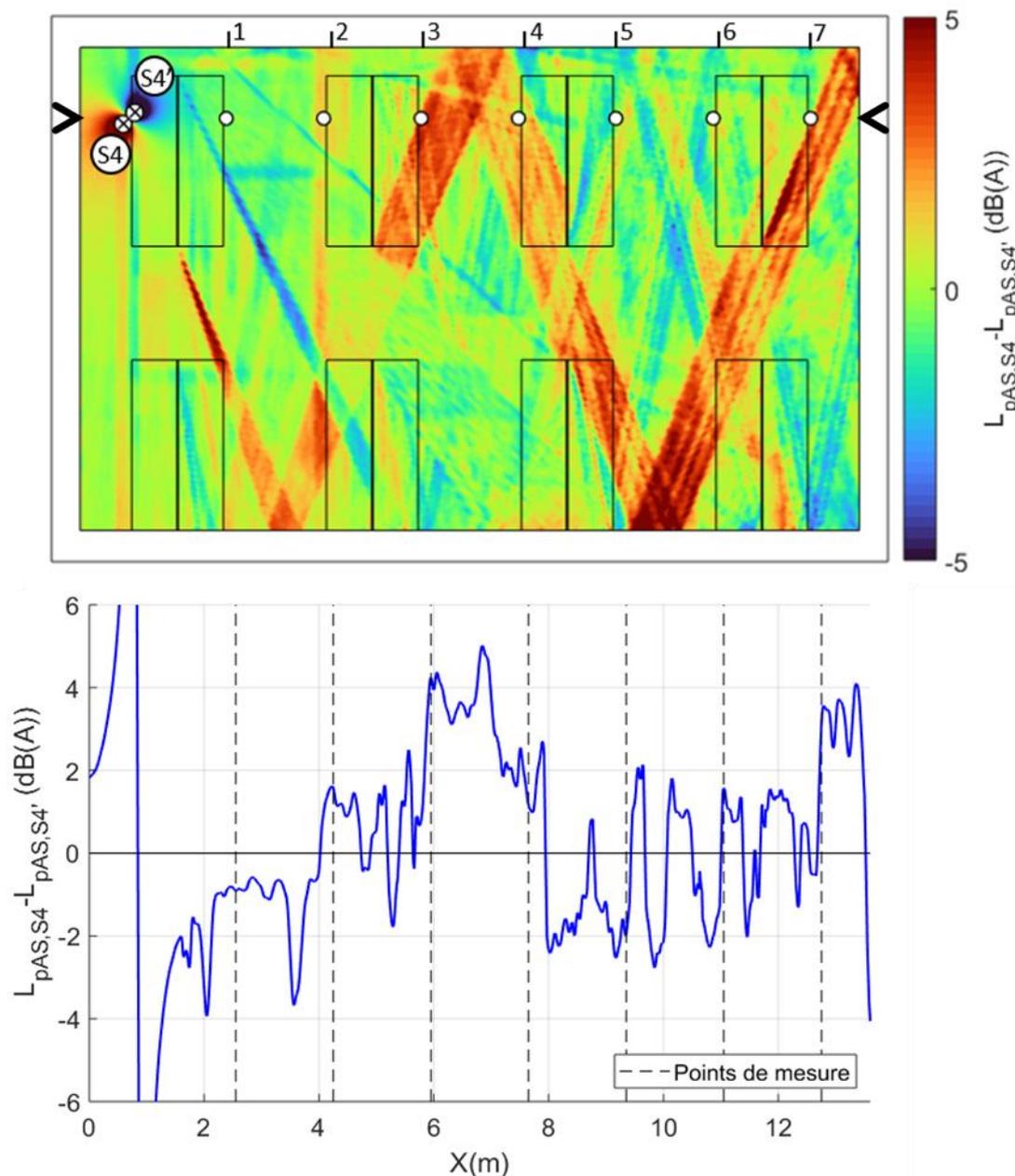


Figure II-9 : En haut : Cartographie de la différence entre les champs de pression pour deux positions de la source 4 (cercles barrés). Les cercles représentent les points de mesure de la ligne P4. En bas : Différence entre les pressions dues aux deux sources le long de la ligne de mesure (situées entre les deux flèches sur la cartographie)

Afin de mettre en évidence que seule l'erreur de positionnement de la source est à l'origine de l'erreur d'estimation de l'incertitude de mesure de L_{pAS4m} , l'approche numérique, présentée Figure II-5, et plus particulièrement l'étape 1.a, a été modifiée comme suit.

Dans un premier temps, le positionnement de la source acoustique a été supposé parfait : le tirage aléatoire des erreurs de positionnement ne concerne donc que les microphones. Dans un second temps, c'est le positionnement des microphones qui a été supposé parfait : le tirage aléatoire d'erreur de positionnement concernait uniquement les sources acoustiques.

Ces deux modifications permettent d'évaluer la précision des expressions analytiques dans trois cas (voir Figure II-10) :

- (1) : le positionnement de la source est parfait, mais le positionnement des microphones est inexact.
- (2) : le positionnement des microphones est parfait, seul celui de la source acoustique est inexact.
- (3) : l'erreur de positionnement concerne autant la source acoustique que les microphones (ce qui a été considéré jusqu'à maintenant)

Dans le premier cas (1), l'expression analytique de l'incertitude de mesure donne une valeur identique aux simulations. Dans le second cas (2), une erreur d'estimation apparaît pour les lignes, qui correspondent à celles pour lesquelles les expressions analytiques sont inexactes dans le cas (3). Cela confirme le fait que l'erreur d'estimation de l'incertitude de mesure est due au fait que l'erreur de positionnement de la source peut entraîner des variations de niveaux aux différents points de mesure, variations qui ne sont pas prises en compte dans les expressions analytiques.

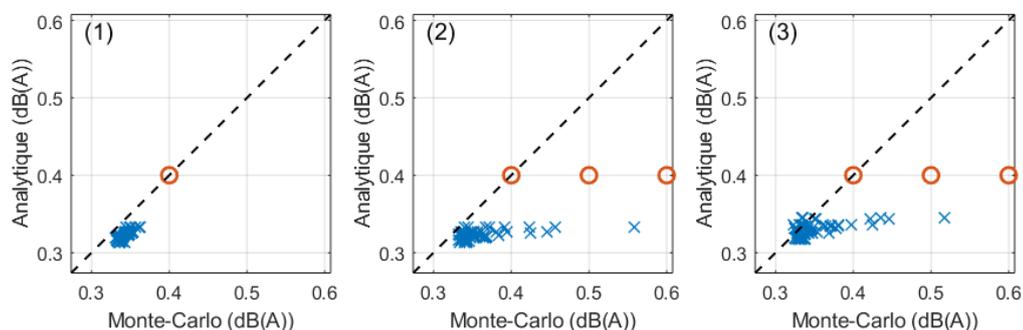


Figure II-10 : Incertitudes de mesure du L_{pAS4m} évaluées à l'aide des expressions analytiques en fonction des valeurs obtenues par la simulation lorsqu'une erreur de positionnement est faite uniquement sur les microphones (1), uniquement sur les sources acoustiques (2) et à la fois sur les microphones et les sources acoustiques (3).

(valeur exacte : croix bleues, valeurs arrondies au dixième supérieur : cercles rouges)

Cette erreur d'estimation de l'incertitude de mesure du L_{pAS4m} ne semble cependant pas problématique : dans le cas correspondant à l'erreur d'estimation maximale, la simulation donne un L_{pAS4m} de $41,6 \pm 1,2$ dB(A) estimé à $41,6 \pm 0,8$ dB(A) par l'expression analytique qu'il faut comparer au critère le plus exigeant des normes existantes aujourd'hui (VDI 2569 [71] et ISO 22955 [5]), à savoir : $L_{pAS4m} \leq 47$ dB(A).

II.7. Question de la valeur unique

La question de la description d'une zone acoustique à l'aide d'une valeur unique des indicateurs de la norme ISO 3382-3 est un débat qui reste aujourd'hui ouvert. La première version de cette norme (publiée en 2012) recommandait de mesurer les indicateurs suivant au moins deux lignes de mesure dans chaque zone acoustique et de présenter, dans le rapport, chaque valeur mesurée. La norme allemande VDI 2569 (2019) [71] recommande de réaliser la mesure sur un nombre de lignes qui dépend du nombre de postes de travail dans une zone acoustique (voir Figure II-11). La récente révision de la norme ISO 3382-3 (2022) recommande, comme sa version de 2012, de réaliser la mesure suivant deux lignes, mais dans le rapport de mesure, une unique valeur des indicateurs doit être reportée pour chaque zone acoustique. Les simulations réalisées ici permettent d'apporter des données à ce débat.

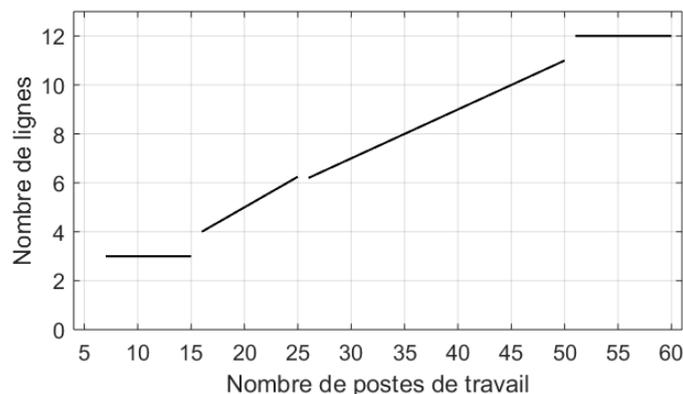


Figure II-11 : Nombre de lignes de mesure à tracer en fonction du nombre de postes de travail présents dans le bureau d'après la norme VDI 2569

Dans notre cas, le bureau simulé n'est constitué que d'une seule zone acoustique, l'aménagement et le traitement acoustique étant homogène. La Figure II-12 représente, pour chaque ligne de mesure et dans chacune des configurations du local, les valeurs moyennes et les intervalles de confiance à 95 % des indicateurs de la

norme ISO 3382-3 (2022). Sur cette figure, il apparaît que dans certaines configurations, les valeurs mesurées sur différentes lignes sont significativement différentes (les intervalles de confiances sont disjoints). Par exemple, dans la configuration pour laquelle les cloisonnettes, qui mesurent 190 cm et sont de classe A, sont associées à un plafond de classe A, les lignes de mesure P2 et P4 donnent une D_{2s} respectivement égale à $5,4 \pm 0,8$ et $7,4 \pm 0,8$ dB(A).

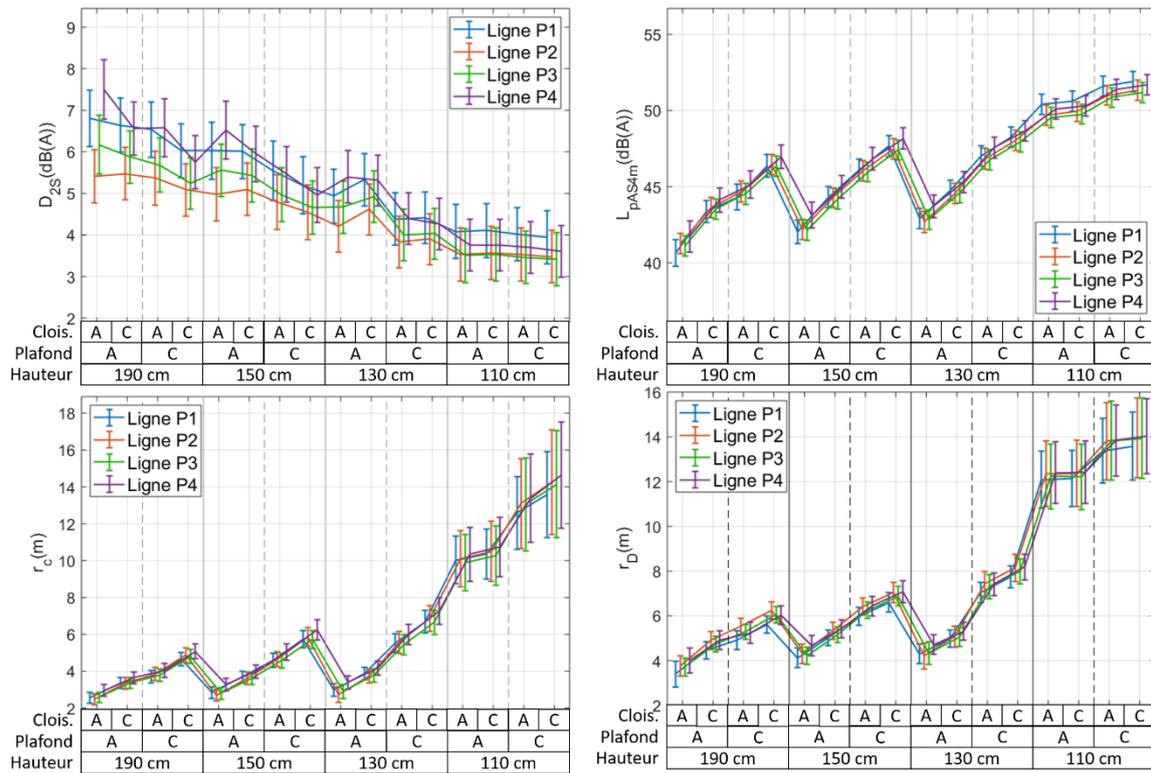


Figure II-12 : Valeurs moyennes et intervalles de confiance à 95 % des indicateurs dans chaque configuration acoustique du bureau ouvert simulé.

Si l'on considère qu'une zone acoustique peut-être caractérisée par une valeur unique des indicateurs, le paradigme de la mesure change également :

- Si une zone acoustique est décrite par une unique valeur, l'incertitude doit être évaluée en agrégeant les mesures faites sur l'ensemble des lignes.
- Si la zone acoustique ne peut pas être décrite par une unique valeur, chaque ligne de mesure doit être caractérisée par une valeur moyenne, associée à une incertitude de mesure.

Aussi, dans le cas des simulations réalisées ici, l'incertitude de mesure de la valeur unique ne doit pas être évaluée à partir de la mesure réalisée sur chaque ligne, mais plutôt à l'issue de l'agrégation des quatre lignes de mesure. Cette approche entraîne

une augmentation des incertitudes : l'étendue de l'incertitude de la D_{2S} passe de 0,4 dB(A) à 0,4-0,9 dB(A), celle de L_{pAS4m} de 0,4-0,6 dB(A) à 0,5-0,6 dB(A), celle de r_c de 0,2-1,5 m à 0,3-1,5 m et celle de r_D de 0,2-1,0 m à 0,3-0,9 m.

Dans cet exemple, seule la D_{2S} est particulièrement sensible au choix de la ligne de mesure. En agrégeant les lignes, le bureau dans lequel des cloisonnettes de classe A de 190 cm sont associées à un plafond de classe A est caractérisé par une D_{2S} de 6,5 dB(A) avec d'une incertitude de 0,9 dB(A). L'intervalle de confiance à 95 % est alors $\pm 1,8$ dB(A). Dans ce cas, il est alors légitime de questionner la capacité de D_{2S} à différencier deux qualités acoustiques différentes.

Schneider *et al.* [58] ont cherché à évaluer l'incertitude de mesure de la D_{2S} et du L_{pAS4m} pour une zone acoustique dans sa totalité (ils supposent qu'une zone acoustique est décrite par une unique valeur). Pour cela, ils associent à la mesure de D_{2S} une incertitude liée au choix de la ligne de mesure, notée $u_{D_{2S}}(\text{ligne})$, en plus des incertitudes liées à l'instrumentation. Les expressions analytiques qu'ils ont développées, en appliquant le principe de propagation des erreurs, pour D_{2S} et L_{pAS4m} sont données (Eq. II-20) et (Eq. II-21). Dans ces expressions, $u_{D_{2S}}$ et $u_{L_{pAS4m}}$ sont identiques aux équations (Eq. II-15) et (Eq. II-16). On note que les auteurs ne considèrent pas que la précision de la mesure du L_{pAS4m} est directement impactée par le choix de la ligne, mais que $u_{D_{2S}}(\text{ligne})$ « se transmet » en suivant le principe de propagation des erreurs. À partir des mesures qu'ils ont réalisées dans un bureau ouvert [72], $u_{D_{2S}}(\text{ligne})$ est fixée par les auteurs à 0,52 dB(A).

$$u_{D_{2S}}^2(\text{Schneider}) = u_{D_{2S}}^2 + u_{D_{2S}}^2(\text{ligne}) \quad (\text{Eq. II-20})$$

$$u_{L_{pAS4m}}^2(\text{Schneider}) = u_{L_{pAS4m}}^2 + u_{D_{2S}}^2(\text{ligne}) \cdot \left(\log_2 \left(\frac{r}{4} \right) \right)^2 \quad (\text{Eq. II-21})$$

Les simulations, réalisées dans notre travail, permettent d'évaluer pour chacune des configurations acoustiques :

- $u_{D_{2S}}$ et $u_{L_{pAS4m}}$ à partir de la dispersion pour chacune des quatre lignes de mesure des valeurs des indicateurs,
- $u_{D_{2S}}(\text{Schneider})$ et $u_{L_{pAS4m}}(\text{Schneider})$ à partir de la dispersion des valeurs des indicateurs (en agrégeant les quatre lignes de mesure).

Il est alors possible d'évaluer $u_{D_{2S}}$ (ligne) pour chaque configuration acoustique soit à partir des incertitudes de mesure de D_{2S} (Eq. II-20), soit à partir de celles du L_{pAS4m} (Eq. II-21).

Les résultats de cette évaluation sont présentés Figure II-13. En regardant les valeurs obtenues à partir de L_{pAS4m} , il semble que considérer que $u_{D_{2S}}$ (ligne) comme une constante est pertinent, même si la valeur que l'on pourrait retenir d'après les simulations serait plus importante que celle retenue par Schneider *et al.* (0,61 dB(A) au lieu de 0,52 dB(A)). Cependant, en regardant l'estimation à partir des valeurs de D_{2S} , il apparaît que cette incertitude liée au choix de la ligne de mesure est fortement dépendante de la configuration acoustique (elle varie entre 0,20 et 0,77 dB(A) pour les configurations acoustiques simulées).

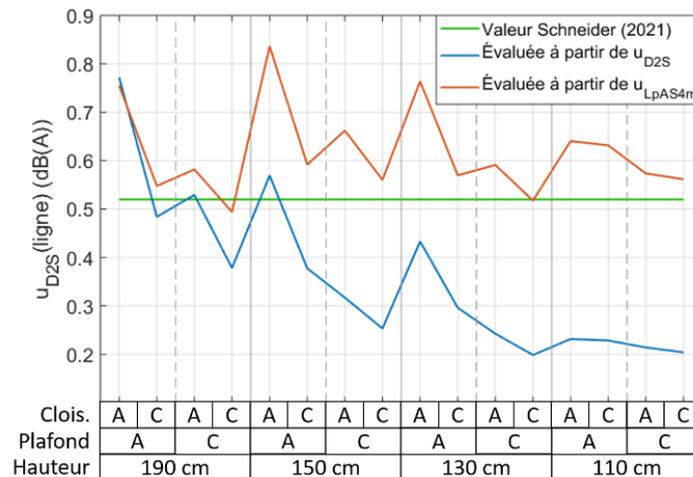


Figure II-13 : Incertitudes de mesure de D_{2S} liée au choix de la ligne de mesure d'après l'hypothèse faite par Schneider *et al.* [58]

La prise en compte de l'incertitude liée au choix de la ligne de mesure proposée par Schneider *et al.* a l'avantage d'être simple mais elle peut entraîner une surestimation des incertitudes de mesure importante, notamment lorsque l'aménagement acoustique d'un bureau est tel que le choix de la ligne de mesure n'a que peu ou pas d'impact sur le résultat de la mesure (par exemple lorsque l'aménagement acoustique est léger ou inexistant). Il semble donc plus pertinent de réaliser (et reporter) plusieurs mesures des indicateurs en appliquant par exemple l'approche de la norme VDI 2569 (2019) [71] qui recommande un nombre de mesures dépendant du nombre de postes de travail dans une zone acoustique.

II.8. Conclusion

Dans ce chapitre, les expressions des incertitudes ont été développées en utilisant le principe de propagation de l'erreur. Les expressions obtenues sont assez complexes et ne peuvent pas en tant que telle être intégrée à une norme. A ce jour seules les valeurs globales sont données dans la norme ISO 3382-3, basée sur les mesures de Hongisto pour un plateau de mauvaise qualité acoustique. Des simplifications de ces expressions sont proposées en annexe de ce manuscrit (Annexe B) qui pourront servir de base de discussions pour la prochaine révision de la norme.

La précision des expressions des incertitudes a ensuite été évaluée à l'aide de simulations d'un aménagement de bureau, dérivé en 16 configurations acoustiques. Ces expressions permettent d'estimer précisément l'incertitude de mesure des indicateurs : dans le cas étudié ici, les expressions analytiques estiment correctement les incertitudes de D_{2s} , à moins de 0,2 dB près celles de L_{pAS4m} , à moins de 0,2 m les incertitudes de r_c et à moins de 0,3 m celles de r_D . Concernant l'erreur d'estimation de l'incertitude de L_{pAS4m} , elle atteint 0,2 dB pour une ligne de mesure lorsqu'un plafond de classe A est associé à des cloisonnettes de classe A de 190 cm de hauteur. Sur cette ligne, les simulations donnent un L_{pAS4m} de $41,6 \pm 1,2$ dB(A) contre $41,6 \pm 0,8$ dB(A) pour l'expression analytique. Cette différence n'est pas problématique sachant que le critère le plus exigeant des normes existantes aujourd'hui (VDI 2569 [71] et ISO 22955 [5]) est : $L_{pAS4m} \leq 47$ dB(A).

Enfin, il semble problématique de décrire une zone acoustique à l'aide d'une valeur unique des indicateurs, en particulier pour la D_{2s} . En effet, celle-ci semble dépendre fortement de la ligne de mesure choisie. La considération d'une unique valeur peut entraîner une forte augmentation de son incertitude de mesure. De plus, la prise en compte de cette dépendance à l'aide d'une approche générale (comme l'ont fait Schneider *et al.*) entraîne une surestimation de l'incertitude de mesure de D_{2s} dans les configurations de faible et moyenne qualité acoustique. Il paraît donc nécessaire de réaliser plusieurs mesures des indicateurs lors de la caractérisation de la performance acoustique des bureaux ouverts. Ce nombre de mesure pourrait être déterminé par le nombre de postes de travail présents dans le bureau, à la manière de la norme VDI 2569 (2016). Chaque mesure réalisée serait renseignée dans le rapport de

mesure, associée à une incertitude de mesure évaluée à l'aide des expressions qui ont été établies dans l'Annexe B.

Chapitre III. Gêne dans les bureaux multi-activités dans le cadre de la norme ISO 22955 : expérience de laboratoire

La norme ISO 22955 (2022) [5] fait des recommandations concernant la performance acoustique des bureaux, recommandations qui ont pour objectif d'assurer que l'environnement sonore du bureau soit compatible avec l'activité qui y est réalisée. La norme introduit une classification des bureaux basée sur les activités, car elles ne présentent pas toutes les mêmes besoins vis-à-vis de l'environnement sonore. Par exemple, une activité collaborative génère des conversations entre les membres d'une équipe, ce qui n'est pas le cas d'une activité non-collaborative. Dans le premier cas, il s'agira donc de limiter l'atténuation des conversations entre postes de travail voisins, tandis que dans le second, il sera important de la maximiser.

Les recommandations de la norme ISO 22955 sont faites notamment à l'aide des indicateurs définis par la norme ISO 3382-3 (2022) [73], à savoir la D_{2S} et le L_{pAS4m} . Cependant, ces indicateurs ne sont applicables que lorsque la géométrie du bureau le permet : dans chaque zone d'un bureau, dans laquelle l'activité est homogène, il faut pouvoir tracer une ligne de mesure, rectiligne ou presque, reliant un minimum de cinq postes de travail situés à plus d'un mètre des murs. Cela est problématique dans les bureaux ouverts de petites tailles ou dans les bureaux hébergeant plusieurs activités différentes. C'est pourquoi la norme ISO 22955 introduit un nouvel indicateur : l'atténuation du niveau pondéré A de la parole, mesurée entre deux postes de travail et notée D_{AS} . Cet indicateur peut être mesuré dans l'ensemble des bureaux ouverts, quelle que soit la géométrie car c'est une mesure réalisée entre deux postes de travail quelconques.

La norme traite particulièrement le cas des bureaux hébergeant différentes activités, car ce type d'espaces présentent des enjeux acoustiques qui lui sont propres. En effet, il s'agit non seulement de s'assurer que l'environnement sonore de chaque activité est adapté aux tâches réalisées mais également de garantir qu'une activité effectuée dans le bureau ne perturbe pas la réalisation des autres. Pour assurer ce second point, la norme ISO 22955 développe une approche novatrice, spécifique aux bureaux multi-activités, basée sur l'utilisation du D_{AS} .

Dans un premier temps, ce chapitre se propose de présenter les fondements théoriques de cette approche et de souligner ses limites. Dans un second temps, ce chapitre présentera une expérience de laboratoire qui a pour objectif, d'une part, d'étudier la pertinence de l'approche adoptée par la norme ISO 22955 (2021) concernant les bureaux multi-activités et, d'autre part, d'évaluer les valeurs cibles recommandées par la norme et éventuellement d'en proposer une mise à jour.

III.1. Qualité de l'environnement sonore des bureaux multi-activités

Dans le cas des bureaux hébergeant plusieurs activités, la norme ISO 22955 met en place une démarche et des recommandations visant à assurer que l'environnement sonore est adapté aux tâches réalisées. Cette démarche est divisée en deux étapes. La première consiste à évaluer la qualité de l'environnement sonore propre à chaque activité. La seconde étape vise à s'assurer que l'interaction des différentes activités ne sont délétères pour aucune d'entre elles. Pour cela, la norme s'appuie sur une caractérisation objective de l'environnement sonore.

III.1.1. Caractérisation de l'environnement sonore

La méthode la plus immédiate pour caractériser un environnement sonore est de mesurer le niveau pondéré A équivalent, noté L_{Aeq} , qui correspond au niveau d'un bruit continu qui, sur la durée de la mesure, correspondrait à la même énergie acoustique moyenne que l'environnement sonore qui est caractérisé. Cet indicateur permet de limiter l'exposition au bruit des personnes mais ne permet pas à lui seul d'assurer que l'environnement sonore n'entraîne pas d'effets délétères. En effet, le L_{Aeq} est un niveau moyen et ne permet pas de rendre compte des variations temporelles du bruit ambiant. Or, celles-ci, qui sont dues principalement aux bruits de parole dans les bureaux ouverts, sont aussi responsables de la gêne ressentie par les personnes.

La Figure III-1 met en évidence les limitations de l'utilisation du L_{Aeq} pour l'évaluation de la gêne ressentie. Cette figure représente le $L_{Aeq,125ms}$ (le niveau équivalent sur 125 ms) d'un signal de parole intelligible (à gauche) et d'un bruit de ventilation (à droite) qui ont tous deux un niveau équivalent sur 5 min de 40 dB(A). Du point de vue du L_{Aeq} , ces deux environnements sonores sont identiques, alors que l'on sait que la parole intelligible entraîne des effets délétères importants, contrairement au bruit de ventilation.

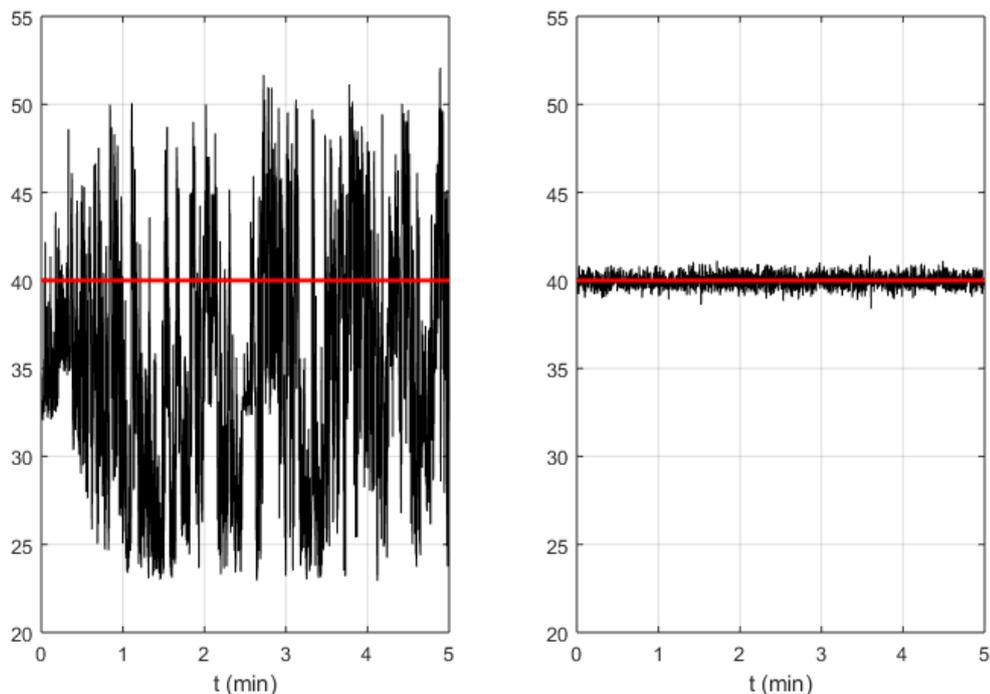


Figure III-1 : L_{Aeq} évalué sur 5 min pour un bruit de parole (à gauche) et un bruit de ventilation (à droite). Les deux signaux ont un niveau équivalent sur 5 min de 40 dB(A)
 En noir : $L_{Aeq,125ms}$, En rouge : $L_{Aeq,5min}$

C'est pourquoi, plusieurs auteurs ont cherché à déterminer un indicateur, évalué à partir de mesure de niveaux en occupation, permettant de prédire les effets néfastes du bruit. S'il est possible d'utiliser des indicateurs complexes tels que la force de fluctuation [74], il paraît également adapté de caractériser les modulations temporelles du niveau de bruit ambiant à partir des différents centiles des niveaux mesurés (le niveau dépassé pendant X % du temps de mesure est noté $L_{A,X\%}$). Par exemple, Renz *et al.* [75] ont mis en évidence un lien entre ($L_{A,10\%} - L_{A,90\%}$) ou ($L_{A,10\%} - L_{A,99\%}$) et la baisse de performance à une tâche de mémoire sérielle causée par le bruit ; tandis que Parizet *et al.* [76] proposent l'utilisation du M_{Aeq} , qui correspond à la différence ($L_{Aeq} - L_{A,90\%}$) et qui peut être reliée à l'intelligibilité de la parole. Ces caractérisations de la variation temporelle d'un signal sonore permettent en effet de différencier les deux bruits donnés en exemple Figure III-1 : le signal de parole est caractérisé par $L_{A,10\%}$ et $L_{A,90\%}$ égaux à 46,5 et 24,1 dB(A) tandis que pour le bruit de ventilation, ceux-ci sont égaux à 41,1 et 38,4 dB(A) (pour un L_{Aeq} valant 40 dB(A) dans les deux cas).

De leur côté, Vellenga et ses collègues [77] ont développé une caractérisation de l'environnement sonore, appelée *Liveliness* qui correspond à une évaluation subjective

de l'animation de l'environnement sonore. Le score de *Liveliness* est défini sur une échelle allant de 1 à 10. Il est évalué en répondant à la question suivante :

J'évaluerais l'animation de cet environnement de bureau comme suit :

(I would rate the liveliness of this office environment as)

1. Silencieux (*Quiet*)
2. Presque silencieux (*Almost quiet*)
3. Plus calme (*More tranquil*)
4. Calme (*Tranquil*)
5. Presque calme (*Almost tranquil*)
6. Presque animé (*Almost lively*)
7. Animé (*Lively*)
8. Plus qu'animé (*More than lively*)
9. Presque agité (*Almost turbulent*)
10. Agité (*Turbulent*)

Vellenga et ses collègues ont développé un modèle permettant de prédire ce score à partir des caractéristiques objectives de l'environnement sonore que sont le L_{Aeq} et de la différence $L_{A,5\%} - L_{Aeq}$, qui caractérisent respectivement la valeur moyenne et les modulations temporelle du niveau de l'environnement sonore. Pour mettre au point ce modèle, 12 environnements sonores enregistrés dans différents bureaux ont été évalués subjectivement par plus de 100 participants (l'enquête a été réalisée en ligne). Ces enregistrements (de 5 min) ont également été caractérisés à l'aide des deux mesures évoquées ci-dessus. Le modèle reliant les mesures objectives et le score de *Liveliness* retenu par les auteurs est représenté Figure III-2.

$>y_4$	5	5.5	6	6.5	7	8	9	10	
y_4	3.5	4	4.5	5	5.5	6.5	7.5	8.5	
y_3	2	2.5	3	3.5	4	5	6	7	
y_2	1.5	2	2.5	3	3.5	4.5	5.5	6.5	
y_1	1	1.5	2	2.5	3	4	5	6	
$<y_1$									
	$<x_1$	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	$>x_7$
	$L_{Aeq,5min}$ dB(A)								

Figure III-2 : Principe de l'évaluation objective du score le *Liveliness* mise en place par Vellenga et al.
Figure extraite de Vellenga et al. [77].

Si les valeurs des différents paramètres de la méthode n'ont pas été communiquées par les auteurs, ceux-ci indiquent tout de même que le L_{Aeq} est catégorisé dans des classes de 3 dB, ce qui veut dire que ($x_2 = x_1 + 3$ dB), ($x_3 = x_2 + 3$ dB), etc.

Vellenga et ses collègues aboutissent donc à une caractérisation des environnements sonores de bureaux, sur une échelle allant de 1 à 10, qui prend en considération à la fois le niveau et les variations de celui-ci et qui est directement liée à la perception de l'animation de l'environnement sonore.

III.1.2. Définition du DAS et établissement des valeurs cibles

La démarche d'évaluation de la qualité acoustique des bureaux *activity based* développée par la norme ISO 22955 (2021) repose sur la caractérisation de l'environnement sonore à l'aide du score de *Liveliness*. La norme commence par classer selon sept types l'ensemble des activités pouvant cohabiter dans le même espace de travail :

- Les activités non-professionnelles (par exemple les pauses),
- Les réunions ayant lieu dans l'open-space,
- Les activités nécessitant de communiquer avec l'extérieur (centre d'appels)
- Les activités nécessitant de la collaboration entre personnes présentes dans le bureau,
- Les activités non-collaboratives,
- Les activités nécessitant de communiquer avec l'extérieur et un effort de concentration important,

- Les activités individuelles nécessitant un effort de concentration important.

La norme recommande d'évaluer dans quelle mesure chaque activité est isolée acoustiquement de ces voisines. Cet isolement est caractérisé à l'aide de l'atténuation du niveau pondéré A de la parole, noté D_{AS} , dont la procédure de mesure est décrite ci-dessous.

La Figure III-3 représente le cas simple d'un bureau dans lequel cohabitent deux types d'activité : il est composé d'un espace de réunions (en vert) et d'un espace consacré à des activités collaboratives (en rouge). Dans ce cas de figure, c'est l'espace de réunion qui va potentiellement engendrer une gêne auprès des personnes réalisant l'activité collaborative. Lors de la mesure du D_{AS} , une source acoustique est donc positionnée à un poste de travail de l'espace de réunion, tandis qu'un microphone est placé à un poste de travail de l'autre zone (normalement le plus proche de l'espace de réunion sensé être le plus gêné par le bruit), comme indiqué sur la Figure III-3.

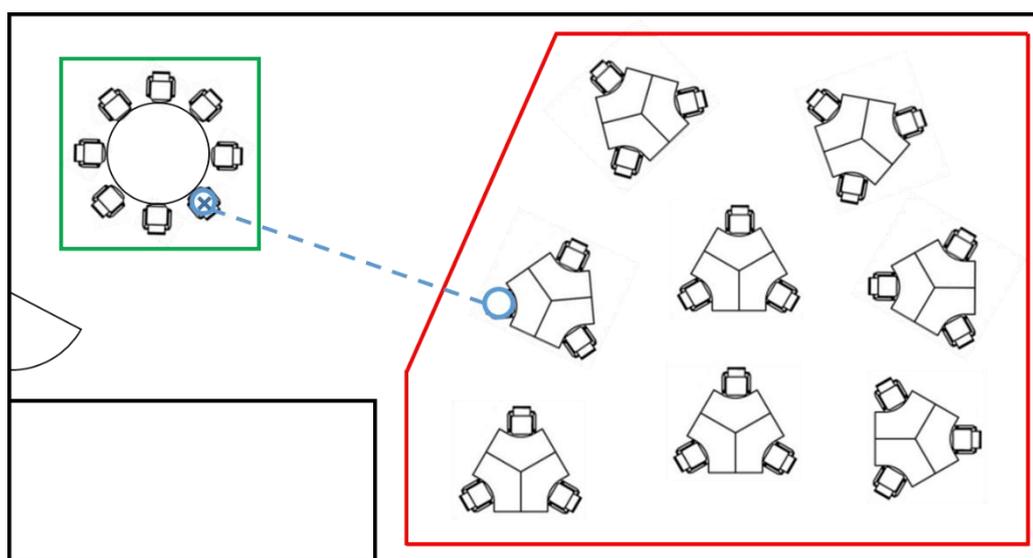


Figure III-3 : Exemple de mesure du D_{AS} dans le cas simple de la cohabitation d'un espace de réunion (vert) et d'un espace où l'activité est collaborative (rouge). La croix encadrée représente la position de la source acoustique et le cercle celle du microphone.

L'appareillage de mesure, comme pour les indicateurs de la norme ISO 3382-3 est positionné à 1,2 m de hauteur, soit la hauteur de la tête d'une personne assise. La mesure du niveau pondéré A de la parole, L_{pAS} , à la position du microphone est faite de la même manière que pour la mesure des niveaux pondérés A de la parole lors de la mesure de la D_{2S} , du L_{pAS4m} et du r_c (cf. (Eq. I-1)). La D_{AS} est alors calculé, suivant la relation (Eq. III-1), comme étant la différence entre le niveau pondéré A de la parole

mesuré à 1 m (L_{pAS1m}), qui d'après la norme ISO 3382-3 (2022) est égal à 57,4 dB(A), et celui mesuré à la position du microphone.

$$D_{AS} = L_{p,A,S,1m} - L_{pAS} = 57,4 - L_{pAS} \quad (\text{Eq. III-1})$$

En plus de définir la méthode de mesure de ce nouvel indicateur, la norme ISO 22955 (2021) en recommande des valeurs cibles. Les développements qui ont permis de les définir sont présentés dans Harvie-Clark *et al.* [73]. Tout d'abord, chacun des types d'activités présenté précédemment a été caractérisé par un score de *Liveliness* et un niveau de bruit ambiant (L_{Aeq}) créé par cette activité et renseignés Tableau III-1. Ces valeurs correspondent à un environnement sonore de bonne qualité pour chacune des activités considérées individuellement. Les valeurs retenues pour le L_{Aeq} sont d'ailleurs, pour la plupart, tirés des valeurs cibles de niveau de bruit ambiant de la norme NF S31-199 (2016) [78].

Typologie d'activité	Score de Liveliness	Niveau du bruit ambiant
Espaces sociaux et de bien-être	8	-
Réunions informelles	7	48 dB(A)
Communication avec l'extérieur (Centre d'appels)	6	48 dB(A)
Collaboratif	6	45 dB(A)
Non-collaboratif	5	42 dB(A)
Téléphone intensif ¹	4	42 dB(A)
Travail individuel focalisé	3	40 dB(A)

Tableau III-1 : Caractéristiques de l'environnement sonore "propre" à chaque type d'activité considéré dans la norme ISO 22955 (tableau repris de Harvie-Clark *et al.* [73])

Les valeurs cibles de la D_{AS} doivent permettre de s'assurer que le bruit généré par une activité ne perturbe pas les personnes réalisant une autre activité qui sont « baignés » dans leur propre environnement sonore. Pour cela, Harvie-Clark propose

¹ « Téléphone intensif » est la traduction française adoptée par la norme ISO 22955 pour « *Focused phone* » qui correspond à une activité réalisée par téléphone qui nécessite un effort de concentration important.

une valeur cible de SNR pour chaque couple d'activités (l'une perturbant l'autre), le SNR étant la différence entre le niveau du bruit ambiant de l'activité perturbée et celui de l'activité perturbatrice (ces niveaux sont mesurés dans la zone perturbée). La norme définit cette valeur cible à partir des scores de *liveliness* des activités considérées d'après la relation (Eq. III-2), qui a été établie par Harvie-Clark *et al.*¹ Cette relation n'est utilisable que lorsque deux activités différentes sont considérées.

$$SNR_{cible} = 3 \cdot \left[Liveliness \left(\begin{array}{c} \text{Activité} \\ \text{perturbée} \end{array} \right) - Liveliness \left(\begin{array}{c} \text{Activité} \\ \text{perturbatrice} \end{array} \right) \right] \quad (\text{Eq. III-2})$$

Les valeurs cibles du SNR retenues par la norme sont présentées Tableau III-2. On remarque que pour les couples Réunion/Réunion et Téléphone intensif/Téléphone intensif, les valeurs cibles sont égales à -6 dB. Aucune justification n'a été trouvée dans la littérature pour expliquer cette valeur. Il apparaît néanmoins que Harvie-Clark *et al.* ont considéré que si deux réunions indépendantes ont lieu dans le même espace, celles-ci vont se perturber l'une et l'autre (il en est de même pour le téléphone intensif), d'où les valeurs du SNR_{cible} retenues pour ces deux cas de figure.

SNR _{cible}		Activité perturbée					
		Réunions	Communication avec l'extérieurs (centre d'appels)	Collaboratif	Non-collaboratif	Téléphone intensif	Travail individuel focalisé
Activité perturbatrice	Espace sociaux et de bien-être	-6	-6	-6	-9	-12	-15
	Réunions	-6	-3	-3	-6	-9	-12
	Communication avec l'extérieurs (centre d'appels)			0	-3	-6	-9
	Collaboratif				-3	-6	-9
	Non-collaboratif					-3	-6
	Téléphone intensif					-6	-9

Tableau III-2 : Valeurs cibles de SNR proposées par Harvie-Clark [73] et retenue par la norme NF ISO 22955 (2021) [5]

Les valeurs cibles de la DAS ont été déterminées à partir des valeurs de SNR_{cible} retenues. Pour cela, on se place dans le cas d'un bruit de parole émis par l'activité perturbatrice se propageant jusqu'à la zone de l'activité perturbée. Le niveau de ce bruit de parole peut être évalué comme le niveau d'un bruit de parole à 1 m de la

¹ À notre connaissance, la littérature ne permet pas d'établir clairement la justification de cette relation.

source auquel on retranche la valeur de la D_{AS} (la D_{AS} est, par définition, l'atténuation du niveau pondéré A de la parole entre les deux zones). Pour chaque couple d'activités (perturbatrice/perturbée), la valeur cible de la D_{AS} est définie de sorte que la différence entre le niveau pondéré A de la parole ainsi évalué et le niveau du bruit ambiant « propre » à l'activité perturbée (noté L_{Aeq} et donnés dans le Tableau III-1) soit égale au SNR_{cible} correspondant (donné Tableau III-2) – voir (Eq. III-3).

$$SNR_{cible} = L_{pAS,cible} - L_{Aeq} = (L_{pAS1m} - D_{AS,cible}) - L_{Aeq} \quad (\text{Eq. III-3})$$

Cette approche revient à appliquer la relation (Eq. III-4), dans laquelle L_{pAS1m} a été arrondi au décibel près (il est, d'après la norme ISO 22955 égal à 57,4 dB), aboutissant aux valeurs cibles de la D_{AS} présentées Tableau III-3.

$$D_{AS,cible} = L_{pAS1m} - SNR_{cible} - L_{Aeq} = 57 - SNR_{cible} - L_{Aeq} \quad (\text{Eq. III-4})$$

$D_{AS,cible}$		Activité perturbée					
		Réunions	Communication avec l'extérieurs (centre d'appels)	Collaboratif	Non-collaboratif	Téléphone intensif	Travail individuel focalisé
Activité perturbatrice	Espaces sociaux et de bien-être	15	15	18	24	27	32
	Réunions	15	12	15	21	24	29
	Communication avec l'extérieurs (centre d'appels)			12	18	21	29
	Collaboratif				18	21	26
	Non-collaboratif					18	23
	Téléphone intensif					21	26

Tableau III-3 : Valeurs cibles de la DAS proposées par la norme ISO 22955 (2021)

Cette approche est radicalement différente de la théorie du STI, qui est communément admise dans le contexte du bruit dans les bureaux ouverts. D'après cette dernière, les effets délétères du bruit ne sont liés qu'à l'intelligibilité de la parole et ce quelle que soit la provenance ou le contenu sémantique de celle-ci (cf. I.1.1.2). Cette différence entre la théorie usuelle et l'approche adoptée par la norme ISO 22955 (2021) soulève la question de la prise en compte du type d'activité pour prédire (ou prévenir) les effets délétères du bruit dans les open-spaces. Une autre question soulevée par la norme réside dans le choix des valeurs cibles du D_{AS} , qui sont issues de la définition du SNR_{cible} à partir du score de *Liveliness*, et ce, sans

justifier les scores de Liveliness attribués à chaque activité ou la relation les reliant au SNR_{cible} .

Dans ce contexte, une expérience de laboratoire a été réalisée. Elle vise, d'une part, à mettre en évidence une éventuelle importance de l'activité perturbatrice dans l'évaluation des effets délétères du bruit de parole et, d'autre part, à valider les valeurs cibles de la norme NF ISO 22955 (2021) ou proposer une mise à jour de celles-ci.

III.2. Expérience de laboratoire

Les effets délétères du bruit peuvent être mesurés de manière objective, en évaluant la performance à un test de mémoire sérielle par exemple [6], ou de façon subjective, à l'aide de questionnaires [55,79]. Dans le contexte de la normalisation, et dans un souci de protection des travailleurs, un intérêt particulier est porté sur les effets du bruit sur la santé et le bien-être des personnes exposées (effets sur la fatigue, la charge de travail ou la gêne).

L'évaluation des effets du bruit sur la fatigue perçue, la charge mentale de travail perçue et la gêne ressentie nécessite un protocole plutôt lourd comparé à celui mis en place pour un test de mémoire à court terme notamment parce qu'il est nécessaire d'avoir des durées d'expositions importantes si l'on veut observer des évolutions significatives. Aussi, l'expérience mise en place, ici, est précédée d'un test de mémoire sérielle évaluant les effets du bruit sur la performance cognitive qui permettra de dimensionner les conditions sonores utilisées pour l'expérience principale.

Dans le cadre de cette expérience, on considère deux activités perturbatrices et une activité perturbée issues de la classification de la norme ISO 22955 (2021) : « Espace sociaux et de bien-être » et « Communication avec l'extérieur » perturbent « Travail individuel focalisé ». La norme, recommande un rapport signal sur bruit de -15 dB(A) pour le premier couple d'activités (perturbatrice/perturbée), et de -9 dB(A) pour le second. Elle suppose donc que les effets délétères du bruit de l'activité perturbatrice apparaissent lorsque le SNR est supérieur à ces recommandations.

L'expérience vise donc à étudier la dépendance des effets délétères du bruit de l'activité perturbatrice vis-à-vis du rapport signal sur bruit, et ce en fonction de l'activité perturbatrice. Si les hypothèses de la norme sont vérifiées, cette dépendance doit

varier avec la nature de l'activité perturbatrice. L'expérience permet également d'évaluer la pertinence des valeurs cibles retenues dans la norme.

III.2.1. Construction des pistes sonores

L'ensemble des conditions sonores est constitué d'un mélange du bruit ambiant correspondant à l'activité perturbée et de paroles émises par une des activités perturbatrices. Trois pistes sonores ont été construites.

La première piste correspond à un « travail individuel focalisé » qui est, comme son nom l'indique, une activité nécessitant un effort de concentration important et sans collaboration (et donc sans communication verbale). Son environnement sonore est donc très calme : il est dominé par le bruit du système de ventilation et de chauffage du bureau ouvert. À cette composante stationnaire, s'ajoute un ensemble de bruits de claviers et de souris d'ordinateurs, traduisant la présence de personnes réalisant une tâche individuelle.

La seconde piste correspond à des conversations issues d'un espace de pause, c'est à dire des discussions non-professionnelles. Pour l'expérience, les discussions ont été extraites de tables rondes ou d'interviews entre vidéastes sur internet [80–83]. Ces discussions traitent notamment de voyages, de la télévision ou encore de développement personnel.

La troisième piste est constituée de bruits de parole issus d'un centre d'appels. Les bruits de paroles utilisés pour l'expérience ont été enregistrés par l'INRS lors d'une intervention au sein d'un centre d'appels hébergeant le service d'assistance juridique d'une société d'assurance. Les enregistrements ayant été faits en conditions réelles, chacun est constitué non seulement de la voix de l'opérateur considéré mais aussi du brouhaha ambiant. Cependant, les conditions de mesure sont telles que les voix des opérateurs extraites des différents enregistrements sont clairement intelligibles ($SNR > 10\text{dB}$).

Les spectres des trois pistes sonores ont été égalisés pour obtenir un spectre de parole (*Long Term Average Speech Spectrum* – LTASS [84]) dans les tiers d'octaves dont les fréquences centrales sont comprises entre 50 Hz et 12500 Hz. Les spectres

des pistes sonores obtenues, ainsi que l'écart avec le LTASS, sont présentés Figure III-4.

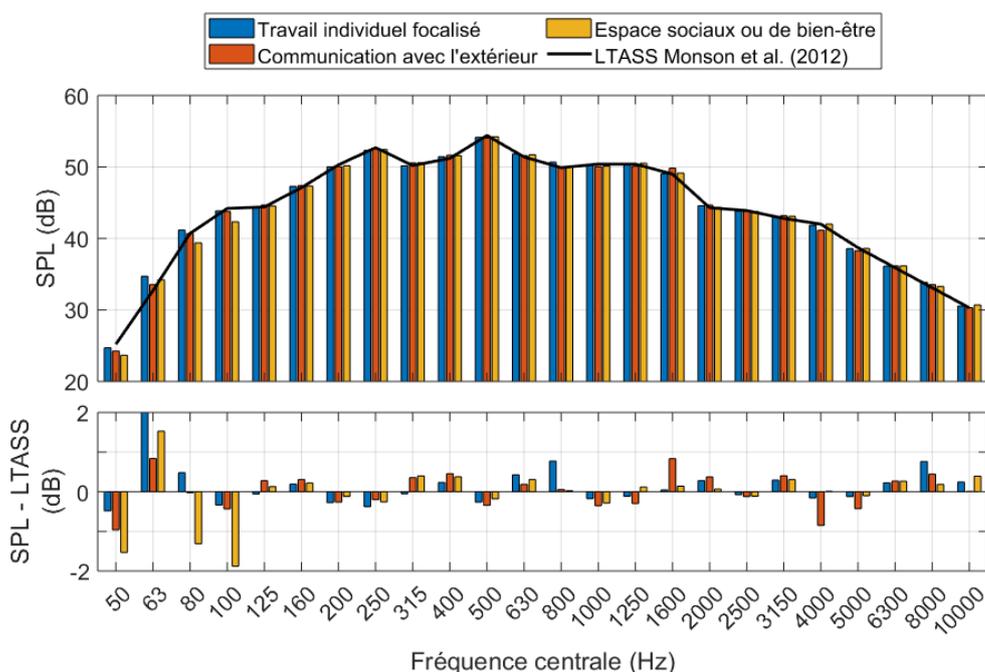


Figure III-4 : Spectres en tiers d'octave des pistes sonores et du LTASS (haut) et écarts des pistes sonores avec le LTASS (bas).

Les conditions sonores utilisées pour les deux expériences sont construites par la superposition d'une des deux pistes de parole (salle de pause ou centre d'appels) et de la piste correspondant au « travail individuel focalisé ». Étant donné que l'on cherche à évaluer les valeurs cibles de la norme ISO 22955, le niveau de l'environnement sonore du travail individuel focalisé est invariant d'une condition à l'autre, tandis que le niveau du bruit de parole varie pour atteindre les différentes valeurs de SNR qui caractérisent les conditions sonores. Cela permet en effet de simuler différentes atténuations (ou valeur de D_{AS}) entre la zone perturbatrice (d'où proviennent les bruits de paroles) et la zone perturbée.

III.2.2. Expérience préliminaire : évaluation objective des effets

Cette expérience préliminaire n'a pas pour but de fournir de nouvelles données permettant d'étudier le lien entre l'intelligibilité de la parole et la performance à une tâche de mémoire sérielle (ce pan de la littérature est déjà bien fourni et relativement consensuel, cf. Figure I-2). Son objectif est plutôt de dimensionner les conditions sonores utilisées pour l'expérience principale.

L'évaluation objective des effets de l'exposition à différents environnements sonores est réalisée, très souvent, à l'aide d'un test de mémoire sérielle qui consiste, pour le participant, à restituer une série d'éléments (chiffres ou mots) qui lui a été présenté visuellement. On évalue alors la performance comme la quantité d'éléments ayant été restitués correctement, c'est-à-dire à la bonne position dans la série. Dans le contexte de l'évaluation objective des effets du bruit, la performance est évaluée dans les différentes conditions sonores considérées, ainsi que dans le silence, et on étudie la baisse relative de performance dans les différentes conditions sonores par rapport à la condition de silence. Ce décrement de performance est défini par l'équation (Eq. III-5), où P est la performance au test de mémoire sérielle, l'indice i renseigne une condition sonore et l'indice 0 correspond à la condition sonore de référence (le silence).

$$DP_i = 100 \cdot \frac{P_0 - P_i}{P_0} \quad (\text{Eq. III-5})$$

Dans le cadre de cette expérience préliminaire, 12 conditions sonores ont été retenues : chaque activité perturbatrice a été présentée pour des SNR¹ compris entre -6 dB et +9 dB avec un pas de 3 dB. À ces conditions sonores, s'ajoute la condition de référence qu'est le silence. Ces 13 conditions ont été présentées de manière binaurale diotique, par l'intermédiaire d'un casque Sennheiser HD650 (Sennheiser electronics GmbH & Co., Wedemark, Allemagne).

L'expérience, dont le déroulement est présenté Figure III-5, est divisée en 10 blocs répartis sur deux sessions identiques d'une trentaine de minutes. Chacun des blocs est constitué de 13 mesures de performance, correspondant aux 13 conditions sonores. Afin d'éviter l'apparition d'un biais de mesure, l'ordre de présentation des conditions sonores est tiré aléatoirement pour chacun des blocs. Lors de la mesure de la performance, le sujet est exposé à une condition sonore durant l'ensemble du processus (présentation – rétention – réponse). Un arrangement des chiffres compris entre 1 et 9 lui est présenté, à l'écran (Helvetica, noir sur fond blanc, hauteur des chiffres à l'écran : 2 cm), un chiffre à la fois (chiffre affiché pendant 1 s, suivi d'un blanc

¹ le SNR est la différence entre le niveau du bruit ambiant de l'activité perturbée et celui de l'activité perturbatrice (ces niveaux sont mesurés dans la zone perturbée). Dans le cadre expérimental, il correspond donc à la différence entre le niveau du bruit de parole et celui du bruit correspondant à une activité individuelle nécessitant concentration.

de 0,25 s avant de passer au suivant). Une fois les 9 chiffres présentés, et après un délai de rétention de 2,5 s, le sujet a 14 s pour restituer l'arrangement, dans l'ordre, à l'aide d'un pavé numérique qui apparaît à l'écran. Chaque chiffre ne peut être renseigné qu'une seule fois, et il n'est pas possible de revenir en arrière ou d'indiquer un oubli au milieu de la série. Une fois cette période de réponse finie, et après une pause de 2 s dans le silence, un nouvel arrangement est présenté au sujet (associé à une nouvelle condition sonore). Les sujets ont, lors de chaque session, la possibilité de prendre trois pauses de 20 s dont l'utilisation est laissée entièrement à leur discrétion (ces pauses ont lieu entre deux séries de chiffres). L'ensemble de cette expérience a été réalisée à l'aide d'une application développée dans l'outil AppDesigner du logiciel MATLAB R2018b (Matworks Inc., Natick, Massachusetts, États-Unis). La performance aux tests de mémoire sérielle correspond au nombre de chiffres d'une série qui ont été restitués à la bonne position. Elle est donc comprise entre 0 et 9.

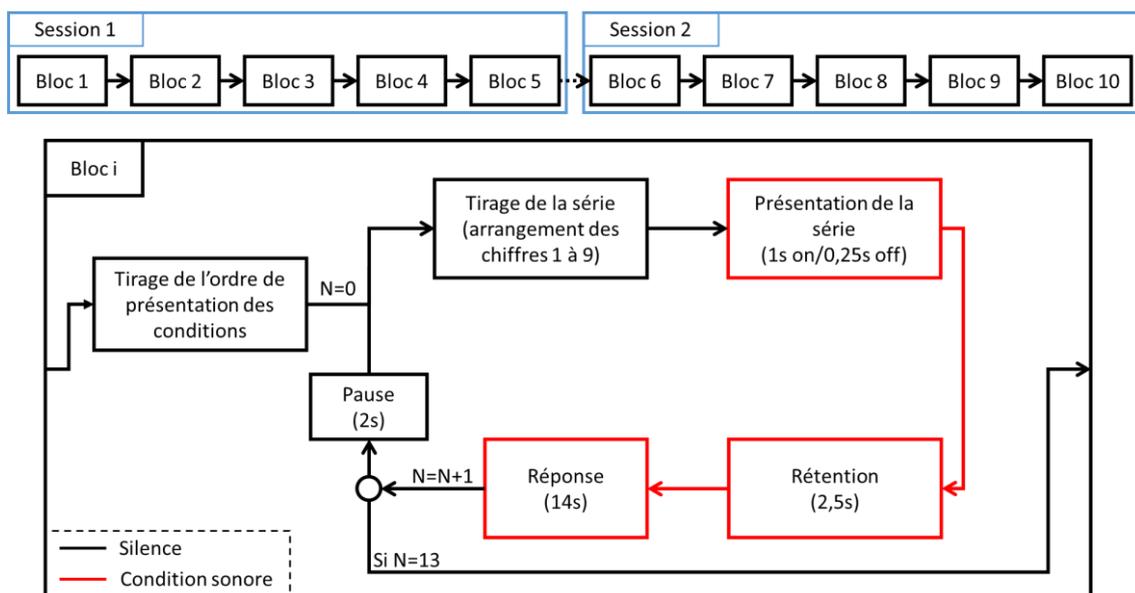


Figure III-5 : Procédure de l'expérience de mémoire sérielle

22 personnes ont participé à cette expérience (15 hommes et 7 femmes). Toutes ces personnes ont déclaré ne pas être atteintes de pertes auditives.

Une première analyse a été réalisée afin d'étudier l'évolution de la performance au fur et à mesure de l'avancement de l'expérience. Pour mettre en évidence un éventuel effet d'apprentissage, une ANOVA à mesures répétées à deux facteurs a été réalisée à l'aide du logiciel STATA MP® version 14. Ces deux facteurs sont la condition sonore

et le bloc. Cette analyse statistique met en évidence un effet significatif du bloc ($p < 0.001$), qui est clairement visible sur la Figure III-6 qui représente la performance moyenne mesurée pour chacun des blocs.

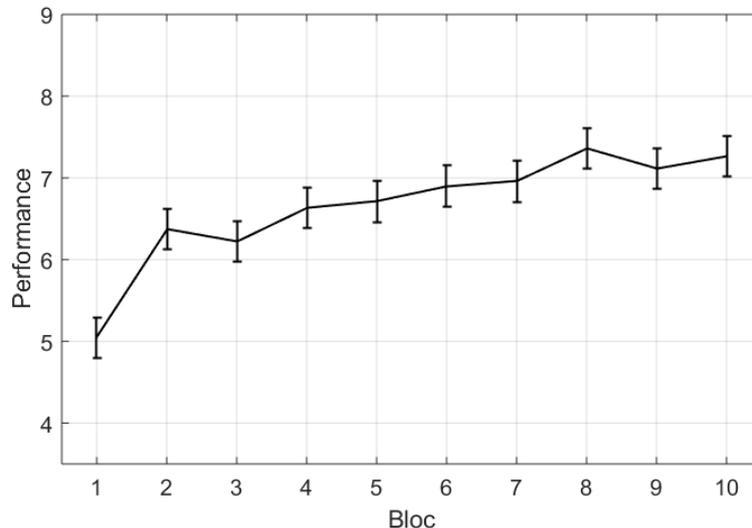


Figure III-6 : Performance moyenne (et intervalles de confiance à 95 %) pour chacun des 10 blocs de mesures

Une comparaison de la performance pour chacun des blocs a été réalisée avec un test HSD de Tukey (test de Différence Significative Honnête de Tukey). Ce test met en évidence que les participants ont été significativement moins performants dans le premier bloc que dans les suivants. Un bloc correspond à une période d'apprentissage de 13 séries de chiffres durant laquelle les participants découvrent la tâche à réaliser, se l'approprient et développent des stratégies leur permettant d'être performants.

Afin de limiter l'effet d'apprentissage, pour chaque sujet et pour chaque condition, la performance a été moyennée sur les blocs 2 à 9. Le décrement de performance a été évalué pour chaque participant en suivant l'équation (Eq. III-5). Lors de l'analyse visuelle des résultats, deux participants ont révélé un comportement atypique : ils présentent un décrement de performance fortement négatif (-22,6 % et -47,4 %) suggérant une augmentation forte de performance dans le bruit par rapport au silence. Ces deux participants ont donc été exclus des analyses décrites ci-dessous.

Les valeurs moyennes et intervalles de confiance à 95 % du décrement de performance pour chaque condition sonore sont représentés Figure III-7. Les résultats sur le décrement de performance ont été analysés à l'aide d'une ANOVA à mesure

répétée à deux facteurs intra-sujets : la nature de l'activité et le SNR (les effets principaux et l'interaction de ces facteurs ont été pris en compte).

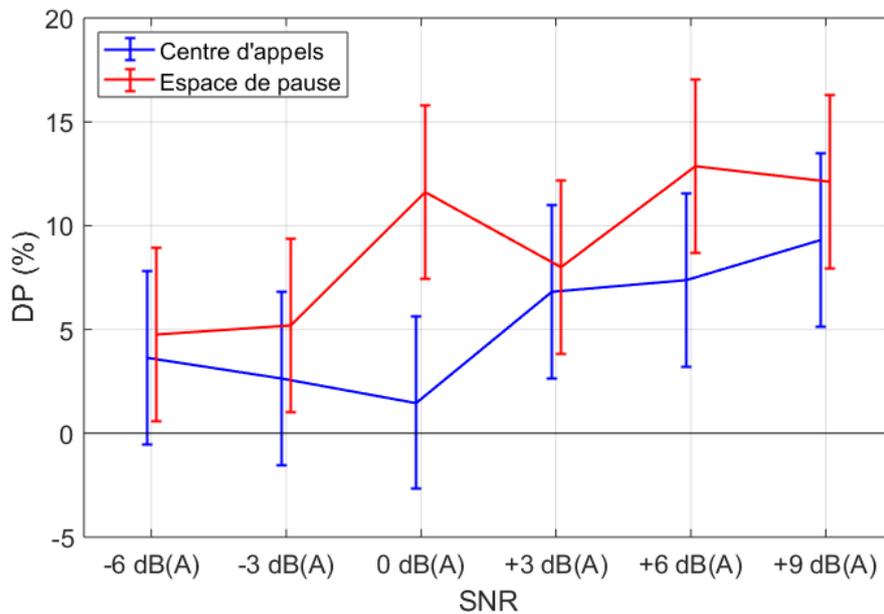


Figure III-7 : Décréments de performance moyens et intervalles de confiance à 95 % en fonction de l'activité perturbatrice et du SNR.

L'analyse met en évidence un effet significatif de l'activité perturbatrice ($p=0,002$) et du SNR ($p=0,009$). Un test HSD de Tukey indique que le décrétement de performance est significativement plus important pour les conversations venant d'un espace de pause que pour celles venant d'un centre d'appels.

Concernant l'effet du SNR, ce test met en évidence qu'un SNR égal à +9 dB entraîne une baisse de la performance plus importante qu'un SNR de -6 dB ($p=0,03$) et de -3 dB ($p=0,02$), mais également que les conditions avec un SNR égal à +6 dB sont plus perturbantes que celles avec un SNR de -3 dB ($p=0,04$). Cela est en accord avec la littérature qui a mis en évidence que plus une conversation est intelligible (ce qui, dans le cas de cette étude se traduit en : plus le rapport signal sur bruit est important), plus le décrétement de performance qu'elle engendre est important [6].

Un test HSD de Tukey réalisé sur l'ensemble des conditions sonores révèle que les conversations provenant d'un espace de pause sont significativement plus perturbantes que celles provenant d'un centre d'appels ($p=0,022$).

L'objectif de l'expérience préliminaire est d'aiguiller le choix des conditions sonores pour l'expérience d'évaluation subjective des effets délétères du bruit. Les conclusions importantes sont les suivantes :

- Sur la plage de SNR considérée, l'activité perturbatrice joue un rôle significatif sur le décrétement de performance.
- Il semble que l'effet du SNR sur le décrétement de performance dépende de l'activité perturbatrice (différence entre les activités lorsque le SNR est égal à 0).

III.2.3. Expérience longue : évaluation subjective des effets

Les effets délétères du bruit de parole ne se limitant pas uniquement à une diminution de la performance des personnes exposées, il est important d'évaluer également les effets du bruit sur les facteurs psychologiques tels que la fatigue ressentie, la charge mentale de travail perçue et la gêne sonore comme cela a été fait lors de précédentes études [25,47,79]. Cela est d'autant plus important que cette étude à vocation à apporter des éléments nouveaux pour les normes visant à protéger la santé des salariés.

L'objectif de cette seconde expérience est donc d'évaluer l'influence de la nature de l'activité sur les facteurs psychologiques évoqués ci-dessus.

III.2.3.1. Cadre expérimental

L'expérience a eu lieu dans la chambre semi-anéchoïque du Laboratoire Vibrations et Acoustique de l'INSA de Lyon. La surface utilisable de cette salle est de 55 m² (8,6 m x 6,4 m). Quatre postes de travail ont été installés sur le côté gauche de la salle comme illustré sur la Figure III-8. L'expérimentateur (ainsi que le matériel de génération des conditions sonores) ne sont pas visibles sur la photo. Ils étaient installés sur le côté droit de la salle ce qui permettait à l'expérimentateur de pouvoir observer en permanence le comportement des sujets. Les postes côte à côte ont été séparés à l'aide de cloisonnettes, dont l'intérêt était d'isoler visuellement les participants.

Une source sonore omnidirectionnelle (Ntek Omni 5") était positionnée, au sol, à même distance des quatre postes de travail. Les conditions sonores (voir III.2.3.2) ont été égalisées pour conserver un spectre de parole malgré la réponse fréquentielle de la source selon un protocole détaillé plus loin.

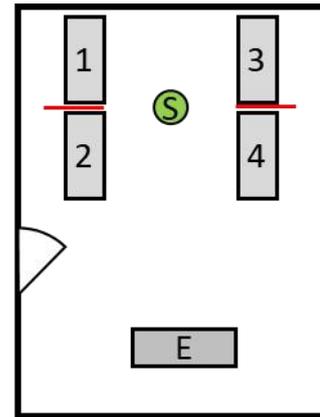


Figure III-8 : Banc expérimental. Photo prise depuis le bureau de l'expérimentateur (E). La source (S) est posée au centre des quatre postes (1-4). Les postes voisins sont séparés par une cloisonnette (en rouge sur le schéma).

III.2.3.2. Conditions sonores

L'expérience précédente a mis en évidence que les effets du bruit sur la performance apparaissent autour du SNR égal à 0 dB, que ce soit du point de vue de l'augmentation du décretement de performance ou des différences entre les deux activités perturbatrices. C'est pour cela que les conditions sonores retenues pour cette expérience sont centrées autour du SNR nul. Plus précisément, les conditions sonores retenues pour l'expérience correspondent à un SNR égal à -6 dB, -2 dB, +2 dB et +6 dB. A noter que ces valeurs sont supérieures aux valeurs cibles de SNR présentées Tableau III-2 utilisés pour définir les valeurs cible du D_{AS} (-15 dB pour la parole provenant de l'espace de pause et -9 dB pour celle provenant d'un centre d'appels).

Comme indiqué dans la section III.2.1, les conditions sonores varient en niveau en fonction du SNR. En effet, le niveau global du bruit correspondant au « travail individuel focalisé » a été fixé à 40 dB(A), et les conditions sonores ont été construites en lui ajoutant les bruits de parole suivant les quatre valeurs de SNR retenues. En pratique, le niveau du bruit correspondant au « travail individuel focalisé » a été mesuré à 41 dB(A) en moyenne sur les quatre postes de travail. Aussi, les niveaux pondérés A globaux sont égaux à 42 dB(A), 43 dB(A), 45 dB(A) et 48 dB(A) pour les conditions dont les SNR sont égaux à -6 dB, -2 dB, +2 dB et +6 dB respectivement.

Comme indiqué précédemment, les conditions sonores sont restituées dans la chambre semi-anéchoïque par l'intermédiaire d'une source omnidirectionnelle (Ntek OMNI 5"). La réponse fréquentielle de la source a été prise en compte dans

l'égalisation des conditions sonores afin qu'à la position d'écoute, le bruit ait un spectre correspondant au LTASS.

La source est omnidirectionnelle conformément à la norme ISO 16283-1 (2014) [85]. Cette caractérisation est faite à partir de la variation du niveau acoustique émis en fonction de la direction d'émission. La documentation technique de la source Ntek OMNI 5" donne, pour chaque tiers d'octave compris entre 100 Hz et 5000 Hz, l'extremum de la différence entre le niveau émis dans une direction donnée et le niveau moyenné sur l'ensemble des directions (cet écart s'appelle indice de directivité). Il est compris entre -1,0 dB et +1,0 dB pour les tiers d'octave compris entre 100 Hz et 1000 Hz, puis augmente avec la fréquence. Dans le tiers d'octave centré à 5000 Hz, l'indice de directivité est compris entre -2,6 dB et +3,0 dB, ce qui traduit le fait que, plus la fréquence considérée est importante, plus la source est directive, et il paraît naturel que cette tendance s'accroisse pour les tiers d'octave supérieurs à 5000 Hz. La position de la source a été ajustée afin d'homogénéiser au maximum les niveaux de pression acoustique entre les quatre postes de travail.

La Figure III-9 représente les niveaux, en tiers d'octave, mesurés à la position de la tête d'une personne pour les quatre postes de travail réservés aux participants. Lors de la mesure, quatre microphones ont été positionnés autour de la position théorique de la tête (formant un carré d'une vingtaine de centimètres de côté) afin de prendre en compte les mouvements des participants. Les différences entre les valeurs mesurées par ces quatre microphones, aux quatre postes de travail, sont représentées sur la Figure III-9 par des barres d'erreur qui correspondent aux écart-types de ces mesures. Le niveau global du bruit du « travail individuel focalisé » mesuré aux quatre positions est égal à $41,0 \pm 0,8$ dB(A).

Le bruit de fond, moyenné sur les quatre postes de travail, dans la chambre semi-anéchoïque, dont le spectre est représenté Figure III-9, est de 16,0 dB(A), ce qui est bien plus faible que le niveau de toutes les conditions sonores. Cependant, il est dominant dans les tiers d'octave centrés sur 50 Hz et 63 Hz (et c'est aussi dans ces bandes fréquentielles que les écarts entre les niveaux mesurés et le LTASS théorique sont importants). Cela ne pose pas de problème dans le cadre de cette expérience car la majorité de l'énergie acoustique est présente, pour un bruit de parole et donc pour les conditions sonores, dans les octaves allant de 125 Hz à 8000 Hz.

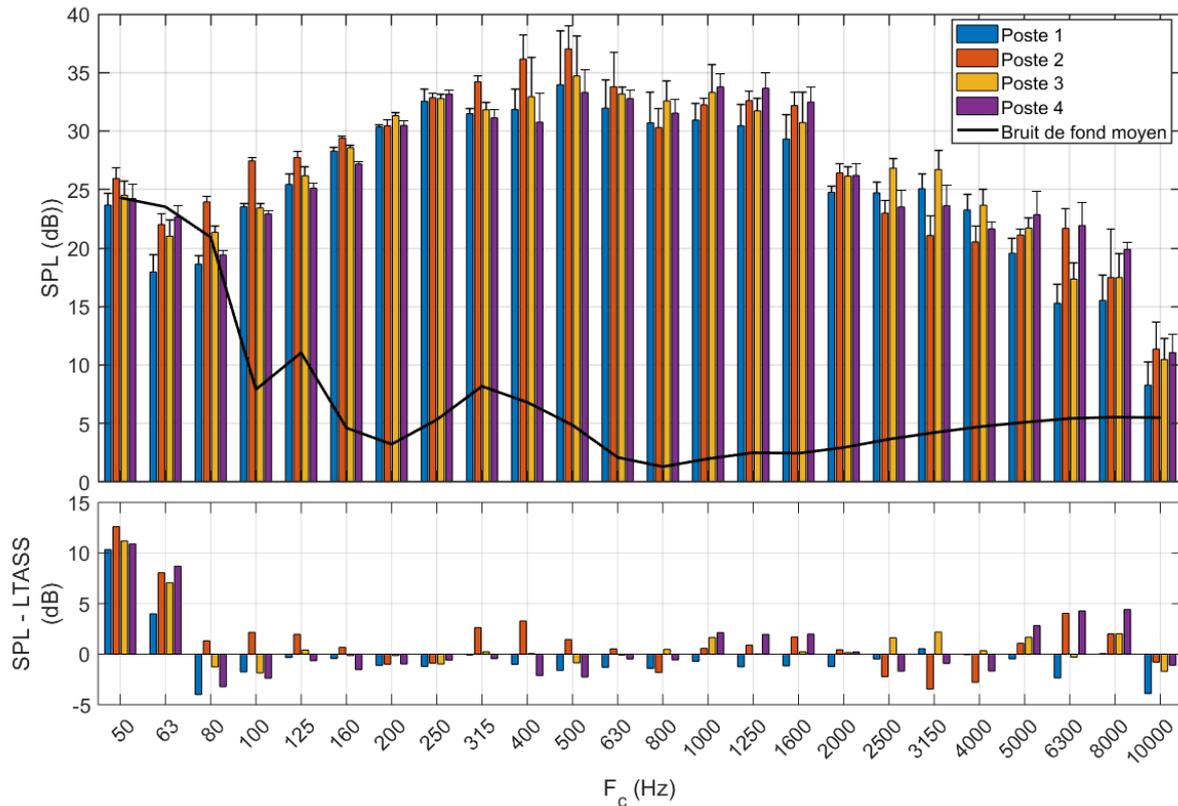


Figure III-9 : Haut : Spectres moyens de la piste sonore "Travail Individuel Focalisé" aux quatre postes (les écart types correspondent aux variations autour de chaque poste) et spectre du bruit de fond moyen.
Bas : Différences entre les spectres moyens et le spectre normalisé de la parole (LTASS)

III.2.3.3. Questionnaires

Durant l'expérience, il était demandé aux participants de répondre à 3 questionnaires évaluant la gêne sonore, la fatigue ressentie et la charge mentale de travail perçue. Ces questionnaires sont présentés dans l'Annexe C.

Le premier questionnaire évalue la perception de l'environnement sonore par l'intermédiaire de trois échelles de Likert à huit points. Il est demandé aux participants de caractériser l'environnement sonore selon les échelles suivantes : « Pas gênant du tout » à « Extrêmement gênant », « Pas bruyant du tout » à « Extrêmement bruyant » et « Pas fatigant du tout » à « Extrêmement fatigant ».

Le second questionnaire, la version française du MFI20 [48–50] évalue la fatigue perçue par l'intermédiaire de 20 assertions, dont les répondants doivent indiquer si elles caractérisent leur état à l'aide d'échelles de Likert à cinq points (allant de « Oui, c'est vrai » à « Non, ce n'est pas vrai »). Ce questionnaire évalue la fatigue perçue suivant 4 dimensions :

- La « Fatigue générale », qui, comme son nom l'indique, traduit la perception du répondant de son état de forme général. Cette dimension comprend des assertions telles que « Je me sens reposé(e) ».
- La « Fatigue mentale », qui traduit la fatigue ressentie par le répondant après la réalisation d'une tâche nécessitant un effort mental. Cette dimension comprend des assertions telles que « Me concentrer sur quelque chose me demande beaucoup d'effort ».
- La « Motivation », qui traduit la capacité, ou non, du répondant à imaginer des activités agréables. Elle comprend des assertions telles que « J'ai envie de faire des tas de choses agréables ».
- La dimension « Activité réduite » qui traduit la capacité, ou l'incapacité, physique du répondant de faire quelque chose. Il est en effet possible de se sentir fatigué tout en étant actif. Elle comprend des assertions telles que « Je pense que je fais beaucoup de choses dans une journée ».

Ce questionnaire a été soumis dans son intégralité mais seules les dimensions fatigue générale et fatigue mentale ont été étudiées lors de l'expérience.

Le troisième questionnaire évalue la charge mentale de travail. Il a été adapté à partir du questionnaire ICA (Individu – Charge – Activité) [52,86]. Ce questionnaire a, en effet, été développé pour évaluer la charge mentale de travail dans le milieu professionnel. Il a donc dû être adapté au contexte de l'expérience de laboratoire. Il est composé de 31 questions auxquelles les sujets doivent répondre à l'aide d'échelles de Likert à huit points (allant de « Pas du tout » à « Tout à fait »). Le questionnaire évalue la charge mentale ressentie à travers quatre dimensions :

- Les « Ressources disponibles instantanées », dimension qui correspond aux ressources cognitives pouvant être utilisées pour la réalisation d'une tâche. Elle comprend des questions telles que « À l'instant présent, avez-vous des difficultés à vous concentrer ? ».
- La « Charge intrinsèque » qui est liée aux paramètres, et à la difficulté perçue, de la tâche réalisée par le répondant. Elle comprend des questions telles que

« La tâche que vous effectuez en ce moment vous demande-t-elle de prendre en compte beaucoup d'informations ? »

- La « Charge externe » qui est liée à la perception de l'environnement dans lequel est réalisée la tâche. Elle comprend des questions telles que « Estimez-vous l'environnement de travail comme trop bruyant ? » ou encore « Estimez-vous l'environnement de travail comme trop chaud ? ».
- La « Charge essentielle » qui correspond aux ressources cognitives que le répondant consacre à l'élaboration et à la mise en place de stratégies lui permettant d'être efficace dans la réalisation de la tâche. Elle comprend des questions telles que « Avez-vous l'impression d'avoir gagné en efficacité depuis le début de l'activité ? ».

III.2.3.4. Protocole expérimental

L'expérience comprenait huit conditions sonores correspondant aux deux activités perturbatrices décrites précédemment (salle de pause et centre d'appels) et quatre SNR. L'expérience se déroulait sur deux demi-journées (deux matinées ou deux après-midis pour éviter un biais potentiel lié au rythme circadien) - une par activité perturbatrice -, chacune divisée en quatre sessions de 50 min séparées par des pauses de 10 min (voir Figure III-10). Lors de chaque session, les participants étaient exposés à une condition sonore. Chaque demi-journée d'expérimentation débutait par l'évaluation de l'état de fatigue perçue à l'aide du questionnaire MFI.

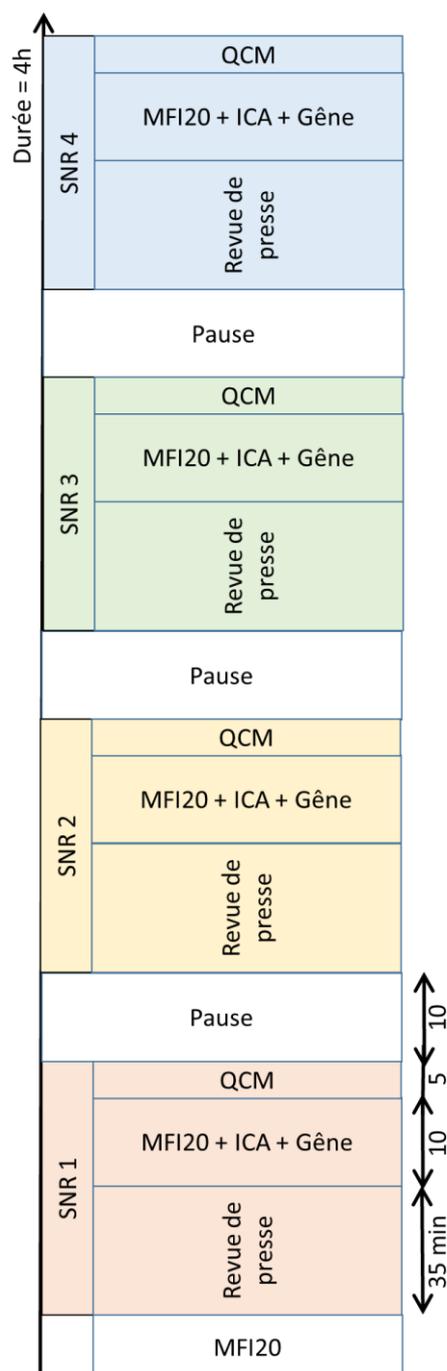


Figure III-10 : Déroulement de chaque demi-journée d'essais

Les 35 premières minutes étaient consacrées à la réalisation d'une tâche de revue de presse. Les participants devaient prendre des notes sur un dossier de presse d'environ 6600 mots ; ces notes devant permettre la rédaction d'un résumé du dossier. Étant donné le nombre de conditions sonores, huit dossiers ont été constitués à partir d'articles publiés dans la presse nationale, qui sont présentés dans l'Annexe C.

Chaque dossier portant sur un des thèmes suivants ayant fait l'actualité sur la période fin 2020 – fin 2021 :

- Le retrait américain d'Afghanistan,
- L'invasion du Capitole aux États-Unis,
- Le Rapport Sauvé sur la pédocriminalité dans l'Église,
- L'opposant politique russe Navalny,
- La crise des sous-marins australiens,
- La gestion de la COVID au Brésil,
- La COP26 à Glasgow,
- Les tensions franco-britanniques autour des accords de pêche post-Brexit.

Après ces 35 min consacrées à la revue de presse, les documents étaient recueillis par l'expérimentateur et les participants devaient alors répondre aux trois questionnaires décrits plus haut. Une fois les questionnaires complétés, un questionnaire à choix multiples sur le dossier de presse était soumis aux participants. L'intérêt de ces questionnaires étaient, non seulement d'évaluer la performance à la tâche de revue de presse, mais surtout de garder les participants investis dans la tâche à réaliser.

L'ordre de passage des activités perturbatrices a été équilibré entre les groupes de sujets. De même, l'ordre de passage des SNR au sein des deux demi-journées a été déterminé suivant un carré latin équilibré afin d'éviter un biais de mesure lié à un effet d'ordre ou un effet séquentiel (influence des conditions précédentes).

32 personnes (18 femmes, 14 hommes), recrutées par une société extérieure, ont participé à l'expérience, contre rémunération. L'âge moyen était de 41 ans et variait entre 18 ans et 65 ans. Les participants disposaient, à minima, d'un baccalauréat et déclaraient ne pas être atteints de pertes auditives. Pour des raisons pratiques, les participants étaient répartis en 9 groupes (5 groupes de 4 et 4 groupes de 3).

III.2.3.5. Résultats

Pour rappel, les réponses au questionnaire évaluant la perception de l'environnement sonore sont faites sur des échelles de Likert. Les résultats ont donc été analysés à l'aide de régressions logistiques ordinales à deux facteurs fixes (Activité perturbatrice et SNR) et un facteur aléatoire (participant). Ces régressions sont suivies

de tests de comparaisons, avec un ajustement de Bonferroni lors de comparaisons multiples.

Les résultats de la réponse à la question demandant aux participants de juger du caractère gênant des conditions sonores est représenté Figure III-11. Sur cette figure, il apparaît que les conditions correspondant à l'espace de pause sont globalement perçues comme plus gênantes que celles correspondant au centre d'appels ($p=0,002$). De plus, une augmentation du SNR entraîne une augmentation de la gêne perçue. Plus précisément, la gêne ressentie lorsque le SNR est égal à -6 dB et -2 dB est inférieure à celle ressentie lorsque le SNR est égal à +2 dB (resp. $p<0,001$ et $p=0,018$) ou +6 dB ($p<0,001$) ; et la gêne ressentie est également plus faible lorsque le SNR est égal à +2 dB que lorsqu'il est égal à +6 dB ($p=0,009$). Il est aussi important de relever que lorsque le SNR est égal à +6 dB, la conversation issue d'un espace de pause est plus gênante que celle provenant d'un centre d'appels ($p=0,0025$).

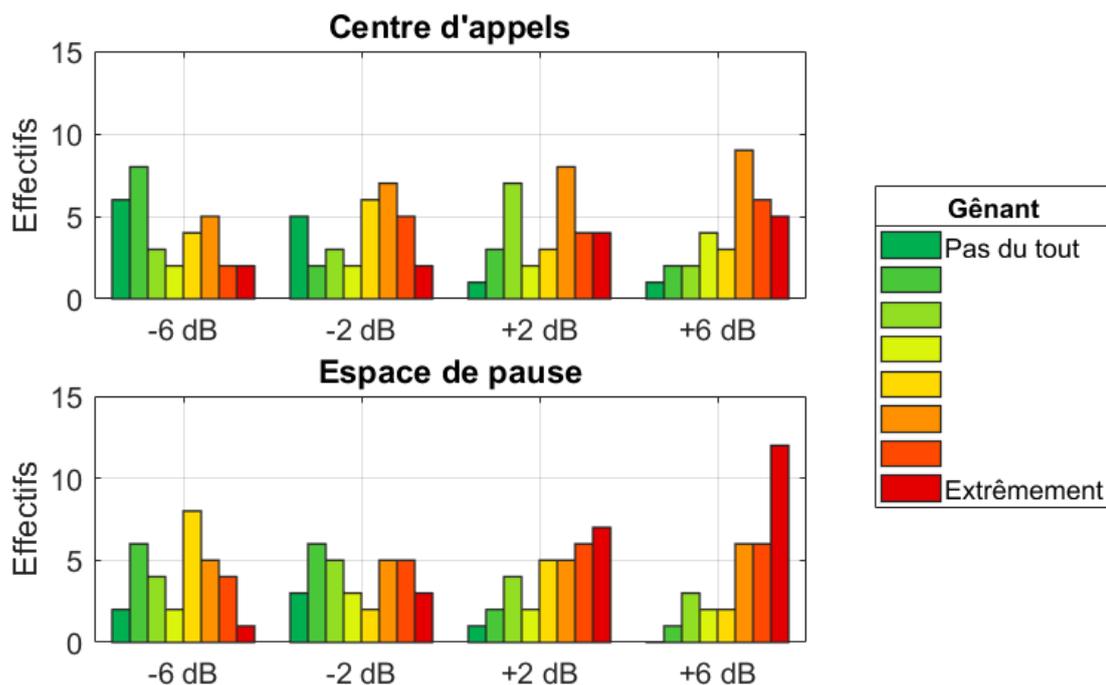


Figure III-11 : Évaluation de la gêne causée par les conditions sonores

Tout comme pour la gêne ressentie, les environnements correspondant à l'espace de pause sont perçus comme plus bruyants que ceux correspondant au centre d'appels ($p=0,049$) et une augmentation du SNR entraîne une augmentation du niveau perçu (-6 dB vs. +2 dB, -6 dB vs. +6 dB et -2 dB vs. +6 dB : $p<0,001$). A nouveau , le

niveau sonore perçu est plus important pour l'espace de pause que pour le centre d'appels pour les deux SNR positifs (+2 dB : $p=0,043$ et +6 dB : $p=0,046$).

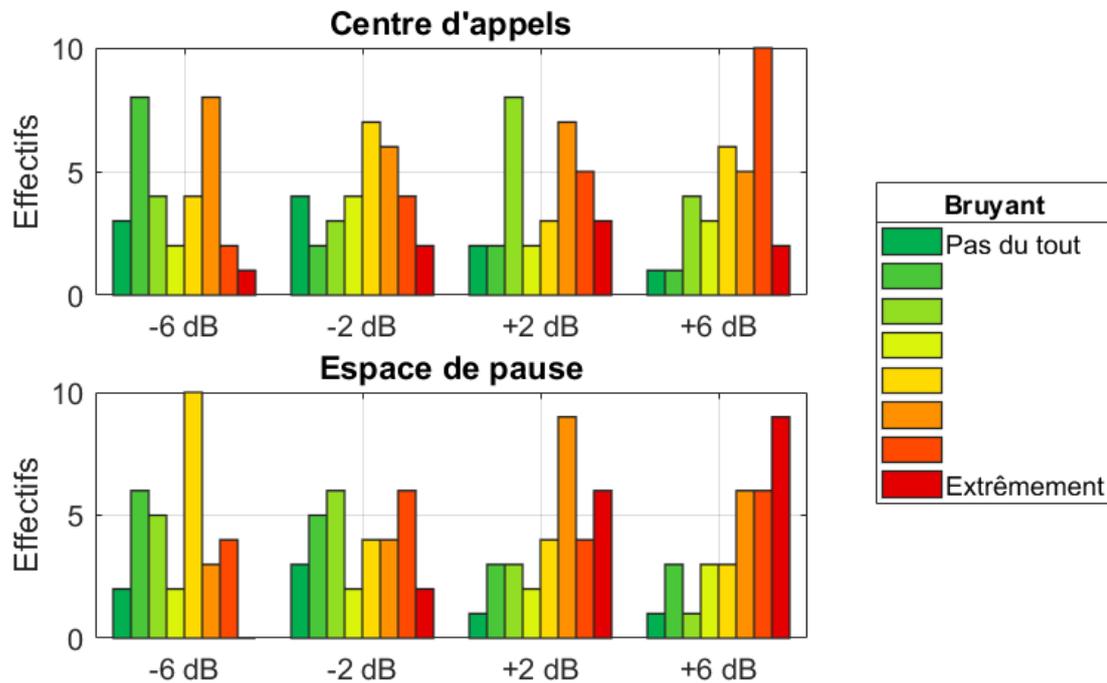


Figure III-12 : Perception du niveau de bruit des conditions sonores

Concernant la dimension liée à la fatigue, il n'y a pas de différences en global, ou à même SNR, entre les deux activités perturbatrices. On observe tout de même que, lorsque le SNR augmente, les conditions sont jugées plus fatigantes (-6 dB vs. +2 dB : $p=0,009$, -6 dB vs. +6 dB et -2 dB vs. +6 dB : $p<0,001$).

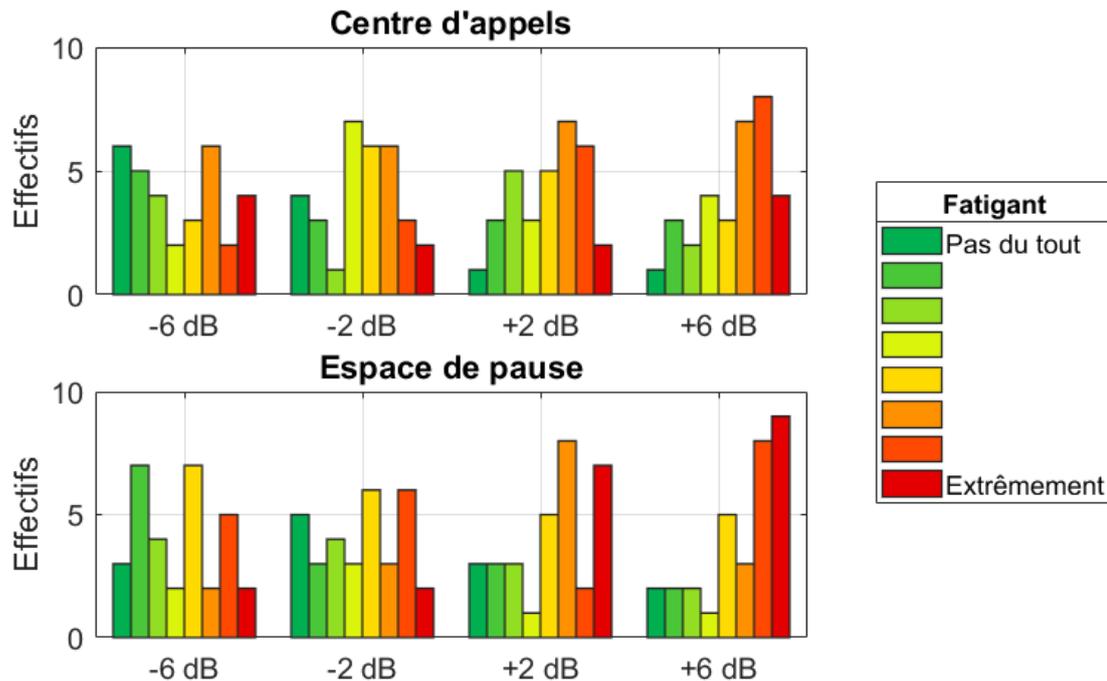


Figure III-13 : Perception de l'aspect fatigant des conditions sonores

Les scores obtenus pour les différentes dimensions des questionnaires ICA et MFI20 étant donnés sur une échelle pseudo-continue, les résultats de ces deux questionnaires ont été analysés à l'aide d'une ANOVA à mesures répétées à deux facteurs (Activité perturbatrice et SNR) suivie de comparaisons à l'aide du test HSD (Différence Significative Honnête) de Tukey.

L'analyse de la variance révèle un effet global significatif de l'activité perturbatrice sur les ressources disponibles Instantanées ($p=0,01$). Cependant, l'effet est si faible que le test de comparaison ne confirme pas cette dépendance. Le SNR a, quant à lui, un effet significatif ($p=0,006$), confirmé par les comparaisons : les ressources disponibles instantanées sont significativement plus faibles lorsque le SNR est égal à +6 dB que lorsqu'il est négatif ($p=0,05$ pour -6 dB et $p=0,02$ pour -2 dB). En comparant les différents SNR indépendamment pour chaque activité perturbatrice, il apparaît que cette dépendance des ressources disponibles instantanées vis-à-vis du SNR n'est présente que pour la parole provenant de l'espace de pause (voir Figure III-14). De plus, les ressources disponibles instantanées sont significativement plus faibles pour les discussions issues d'un espace de pause que pour celles issues d'un centre d'appels lorsque le SNR est positif (+2 dB(A) : $p=0,04$, +6 dB(A) : $p=0,026$). Le Tableau III-4 résume les groupes de significativité au test HSD de Tukey du SNR,

activités perturbatrices confondues (effet global) et indépendamment pour chaque activité perturbatrice (deux conditions ayant une lettre en commun ne sont pas significativement différentes).

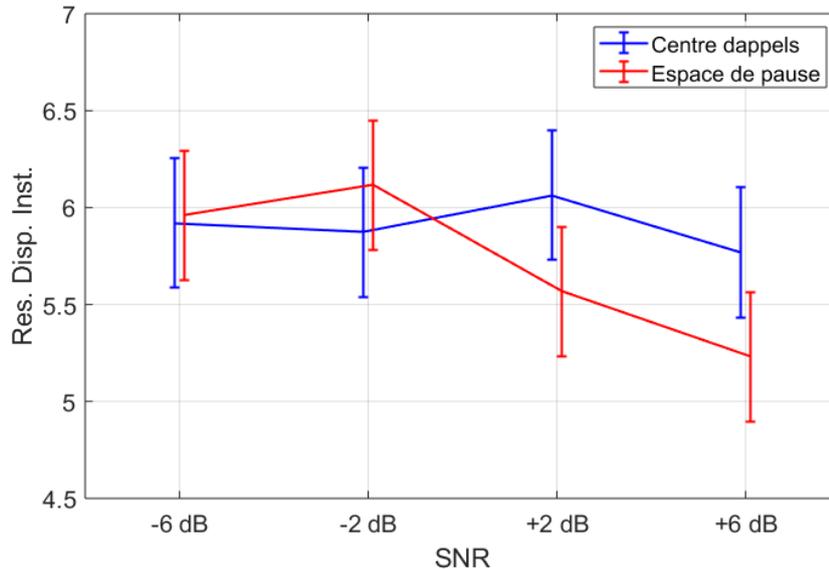


Figure III-14 : Scores mesurés pour la dimension ressources disponibles Instantanées

SNR	Global	Centre d'appels	Espace de pause
-6 dB(A)	A	A	A
-2 dB(A)	A	A	A
+2 dB(A)	AB	A	AB
+6 dB(A)	B	A	B

Tableau III-4 : Groupes de significativité des ressources disponibles Instantanées à partir du test HSD de Tukey mettant en évidence l'effet global du SNR, mais aussi la dépendance de cet effet vis-à-vis de l'activité perturbatrice (deux conditions ayant une lettre en commun ne sont pas significativement différentes)

La charge intrinsèque, qui est représentée Figure III-15, dépend significativement de l'activité perturbatrice ($p=0,016$) : elle est plus élevée lorsque les paroles perturbatrices proviennent d'un espace de pause que lorsqu'elles sont issues d'un centre d'appels. Cette différence entre les activités perturbatrice est significative pour les SNR positifs (+2 dB : $p=0.03$, +6 dB : $p=0.016$).

Le SNR influe significativement et positivement sur la charge intrinsèque ($p=0,005$) : la charge mesurée est significativement plus importante à +6 dB que celle mesurée à -6 dB ($p=0,03$) ou à -2 dB ($p=0,016$). La dépendance significative de la charge intrinsèque vis-à-vis du SNR n'est présente, comme pour les ressources disponibles Instantanées, que pour la parole provenant d'un espace de pause comme

le montrent les groupes de significativité au test HSD de Tukey présentés Tableau III-5.

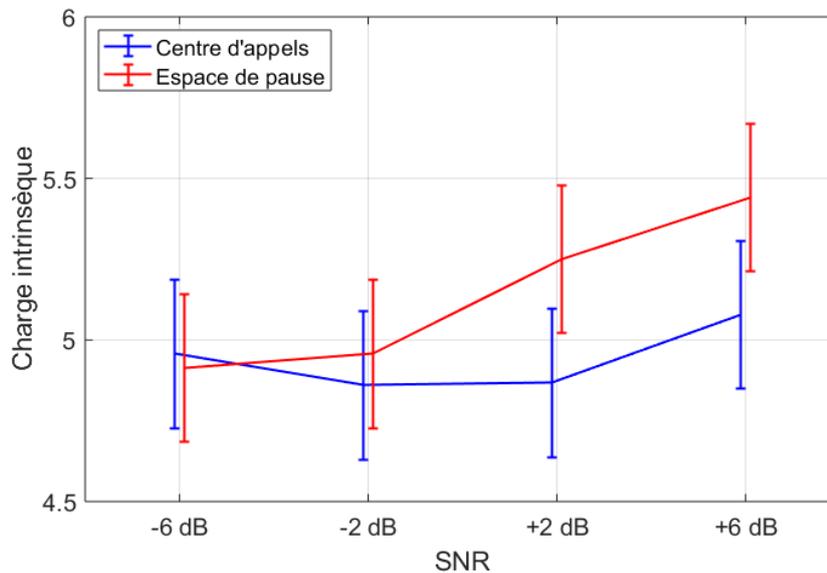


Figure III-15 : Scores mesurés pour la dimension charge intrinsèque

SNR	Global	Centre d'appels	Espace de pause
-6 dB(A)	A	A	A
-2 dB(A)	A	A	A
+2 dB(A)	AB	A	AB
+6 dB(A)	B	A	B

Tableau III-5 : Groupes de significativité de la charge intrinsèque à partir du test HSD de Tukey mettant en évidence l'effet global du SNR, mais aussi la dépendance de cet effet vis-à-vis de l'activité perturbatrice (deux conditions ayant une lettre en commun ne sont pas significativement différentes)

Le SNR influe significativement et positivement sur la charge externe ($p=0,005$) : la charge externe mesurée à +6 dB est significativement plus importante que celle mesurée à -6 dB ($p=0,002$) ou à -2 dB ($p=0,012$). Cependant, la nature de l'activité perturbatrice n'a pas d'importance significative ($p=0,8$).

La charge essentielle dépend significativement du SNR ($p=0,007$), mais tout comme les ressources disponibles instantanées et la charge intrinsèque, cette dépendance n'est présente que pour la parole provenant d'un espace de pause (voir Figure III-16 et les groupes de significativité Tableau III-6). Il est important de noter que lorsque le SNR est égal à +6 dB, la charge essentielle est plus faible pour les discussions issues d'un espace de pause que pour celle issues d'un centre d'appels ($p=0,037$).

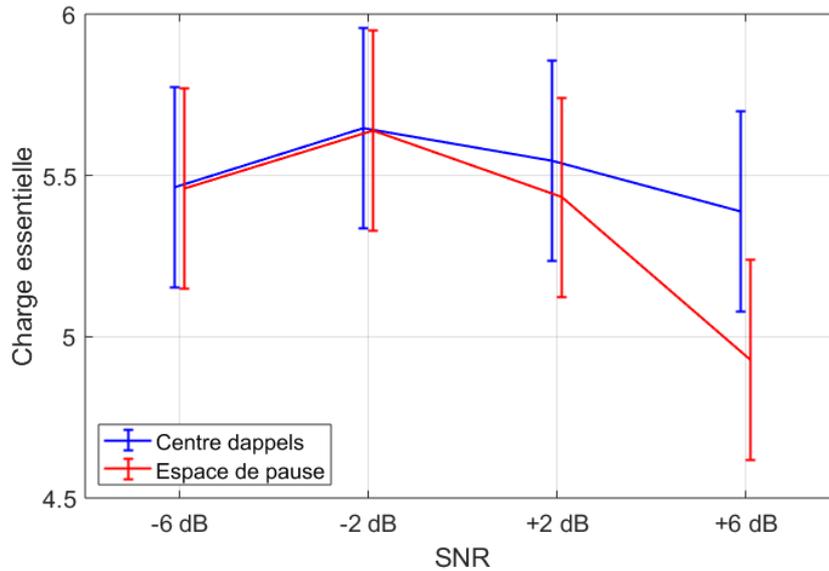


Figure III-16 : Scores mesurés pour la dimension charge essentielle

SNR	Global	Centre d'appels	Espace de pause
-6 dB(A)	AB	A	AB
-2 dB(A)	B	A	B
+2 dB(A)	AB	A	AB
+6 dB(A)	A	A	A

Tableau III-6 : Groupes de significativité de la charge essentielle à partir du test HSD de Tukey mettant en évidence l'effet global du SNR, mais aussi la dépendance de cet effet vis-à-vis de l'activité perturbatrice (deux conditions ayant une lettre en commun ne sont pas significativement différentes)

Deux observations statistiques peuvent être faites concernant la fatigue mentale qui est représentée Figure III-17 :

- L'activité perturbatrice a un effet significatif ($p=0,03$) : les conditions correspondant à l'espace de pause entraînent globalement une fatigue mentale plus importante que celles correspondant au centre d'appels.
- Lorsque les conversations sont intelligibles (SNR égal à +6 dB(A)), celles provenant de l'espace de pause entraînent une fatigue mentale plus importante que celles provenant du centre d'appels ($p=0,015$).

Il est important de noter que les variations du score de fatigue mentale sont faibles. Cela s'explique sans doute par la courte durée de l'exposition aux différentes conditions sonores : les participants étaient actifs durant seulement 35 min (le reste de la durée d'exposition étant consacré aux questionnaires). Kostallari *et al.* [46] ont mis en évidence que la réalisation d'une revue de presse, durant 3 heures et 20 min, était plus fatigant lorsque l'environnement sonore était caractérisé par un M_{Aeq} (la

différence $L_{Aeq} - L_{90\%}$) égal à 10 dB que lorsque ce dernier valait 3 dB. Les conditions sonores utilisées lors de l'expérience présentée ici présentent un M_{Aeq} compris entre 2 et 8 dB (le M_{Aeq} augmente avec le SNR).

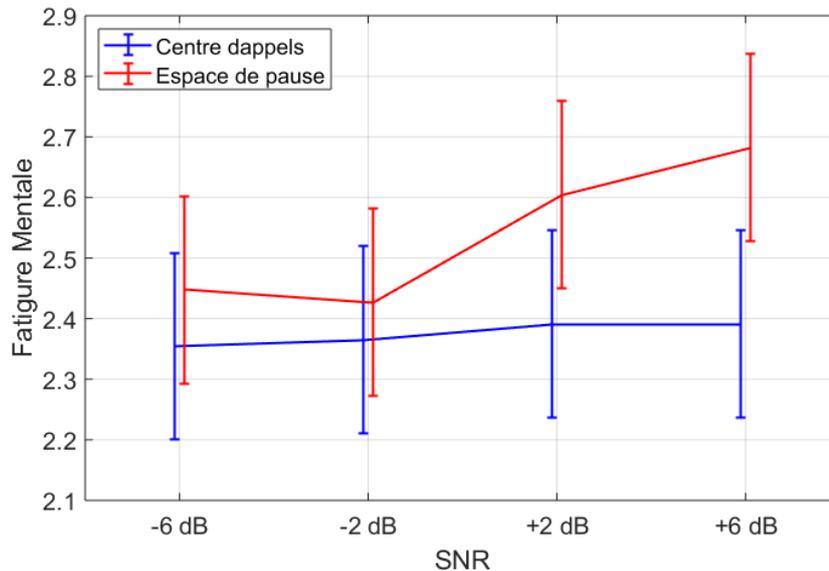


Figure III-17 : Scores mesurés pour la fatigue mentale

Pour résumer, l'augmentation du SNR entraîne une augmentation de la charge externe, indépendamment de la nature de l'activité perturbatrice, ce qui laisse entendre que cette dimension de la charge mentale de travail est sensible à la modulation de niveau de l'environnement sonore. En revanche, la charge intrinsèque n'augmente que lorsque les conversations provenant d'un espace de pause sont intelligibles.

D'après Kostallari [79], les variations des ressources disponibles instantanées sont à mettre en relation avec les variations de la fatigue mentale : une augmentation de la fatigue mentale entraîne une diminution des ressources disponibles instantanées. C'est ce que l'on retrouve dans les résultats de cette expérience : la fatigue mentale et les ressources disponibles ne varient pas avec le SNR dans le cas de discussions issues d'un centre d'appels, mais lorsque celles-ci proviennent d'un espace de pause, et lorsqu'elles sont intelligibles, on observe une augmentation de la fatigue mentale et une diminution des ressources disponibles.

Enfin, la diminution des ressources disponibles instantanées et l'augmentation des charges intrinsèque et externe dans le cas de conversations intelligibles, issues d'un

espace de pause, entraînent une diminution de la charge essentielle, comme le prévoit le modèle ICA [87]. Cette diminution de la charge essentielle traduit le fait que les participants ont éprouvé des difficultés à réaliser la tâche de revue de presse lorsqu'ils étaient exposés à des conversations intelligibles provenant d'un espace de pause.

Les résultats de l'expérience mettent en évidence que les effets délétères du bruit sont dépendant de l'intelligibilité des discussions mais également de la provenance de celles-ci. Cela laisse supposer que le contenu informationnel des discussions joue un rôle important.

III.3. Conclusion

Si les durées d'exposition apparaissent comme un peu courtes pour pouvoir exploiter pleinement les mesures de la fatigue perçue, les résultats de l'expérience mettent en évidence que la nature de l'activité perturbatrice joue, lorsque le SNR est grand, un rôle important dans les effets délétères du bruit de parole. En effet, on observe des différences liées à l'activité perturbatrice lorsque la parole est clairement intelligible (SNR=+6 dB). Dans ces conditions, les discussions provenant d'un espace de pause sont plus problématiques que celles issues d'un centre d'appels : elles entraînent plus de gêne, l'environnement est perçu comme plus bruyant, les ressources disponibles instantanées et la charge essentielle sont plus faibles et la fatigue mentale est plus importante.

Les conséquences de ces résultats pour la norme ISO 22955 sont détaillées dans le chapitre suivant.

Chapitre IV. Analyse critique des indicateurs acoustiques

Lorsque l'on parle de qualité acoustique d'un bureau ouvert, deux notions distinctes sont en réalité évoquées : la performance acoustique du local et la qualité acoustique de l'environnement sonore.

La performance acoustique du local correspond aux caractéristiques acoustiques de la pièce aménagée. Elle est purement objective et correspond à la capacité du local, et de son aménagement, à limiter la propagation de la parole. La performance acoustique est évaluée à l'aide des indicateurs de la norme ISO 3382-3 qui caractérisent la décroissance spatiale du niveau de la parole (avec D_{2S} , L_{pAS4m} et r_c) et de son intelligibilité (avec r_D).

La qualité de l'environnement acoustique d'un bureau ouvert est, elle, liée à la perception de l'environnement sonore par les utilisateurs : l'environnement sonore d'un bureau de bonne qualité acoustique ne doit pas entraîner d'effets délétères, tels qu'une augmentation de la fatigue, une baisse de la performance ou une augmentation de la gêne ressentie, auprès des personnes exposées. La définition de la qualité acoustique doit donc nécessairement prendre en considération l'utilisateur de l'espace de travail.

Dans un premier temps, ce chapitre se propose faire une analyse critique des indicateurs utilisés aujourd'hui pour caractériser la performance acoustique des open-spaces. Ensuite, le lien entre performance acoustique et qualité acoustique des bureaux ouverts sera mis en évidence à l'aide d'enquêtes liant mesures objectives et évaluations subjectives de l'environnement sonores en présence des personnes. Enfin, sur la base des résultats de l'expérience réalisée durant la thèse, de nouvelles valeurs cibles pour la D_{AS} seront proposées.

IV.1. Performance acoustique du local

La norme ISO 3382-3 [4] définit des indicateurs permettant de caractériser le local au moyen de la décroissance spatiale du niveau pondéré A de la parole et de celle de l'intelligibilité de la parole. La procédure de mesure de ces indicateurs a été présentée en détail dans le paragraphe II.1.1 et peut être résumée en trois étapes. Dans un premier temps, une ligne de mesure est tracée à travers le bureau. Cette ligne doit

être « la plus droite possible » et passer au-dessus des postes de travail. La seconde étape correspond à la mesure du niveau pondéré A – ou du STI – le long de la ligne sélectionnée. Pour cela, une source acoustique omnidirectionnelle est positionnée à une extrémité de la ligne (au poste de travail). Le niveau pondéré A de la parole – ou le STI – et la distance à la source sont mesurés à chacun des postes constituant la ligne. L'étape finale consiste à évaluer, à partir des mesures réalisées, le taux de décroissance spatiale de la parole (D_{2s}), le niveau pondéré A de la parole à 4 m de la source (L_{pAS4m}), la distance de confort (r_c) et la distance de distraction (r_D).

Une première critique à l'égard des indicateurs acoustiques de la norme ISO 3382-3 réside dans les contraintes imposées par la procédure de mesure. Le Chapitre II a permis de mettre en évidence que, pour une ligne de mesure donnée, les incertitudes des indicateurs sont faibles, mais que les indicateurs pouvaient fortement dépendre de la ligne considérée. Il semble donc problématique de caractériser un local (ou la zone acoustique) à l'aide d'une unique valeur des indicateurs (comme c'est le cas dans la norme ISO 3382-3 (2022)). Il est alors recommandé de réaliser la mesure suivant plusieurs lignes à la manière de la norme VDI 2569 (2019) [71]. Cette contrainte s'ajoute à celles déjà décrites dans la norme ISO 3382-3 détaillées ci-après. Une ligne de mesure doit comprendre au minimum cinq postes de travail (un poste pour la source acoustique et quatre points de mesure). D'après la norme, la ligne de mesure comprend idéalement entre 6 et 10 points de mesure soit une longueur totale comprise entre 7 et 11 postes de travail. Les postes de travail appartenant à une ligne de mesure doivent également être situés à plus d'un mètre des murs du bureau et la source acoustique doit également être positionnée à plus de 40 cm de la table.

Une seconde critique repose sur le caractère restreint de son application. En effet, la distance de distraction est déterminée pour une position du locuteur et pour une seule direction (celle de la ligne de mesure). La norme suppose que cette distance de distraction est la même dans toutes les directions de propagation et définit donc spatialement un disque autour du locuteur dans lequel tous les postes de travail sont gênés par ce dernier. Cette zone correspond aux positions pour lesquelles la distance au locuteur est inférieure à r_D (ce qui se traduit par un STI supérieur à 0,5) ou à r_c (ce qui correspond à un niveau de parole supérieur à 45 dB(A)). Cependant, dans la majorité des bureaux, l'aménagement dépend fortement de la direction de propagation considérée : les personnes se faisant face sont séparées par des cloisonnettes tandis

que souvent aucune séparation n'est installée entre deux personnes situés côte à côte. Ainsi, dans la majorité des cas, la distance de distraction est fortement dépendante de la direction de propagation considérée.

Par exemple, l'aménagement du bureau simulé dans le Chapitre I est clairement « directionnel » : les cloisonnettes acoustiques sont toutes parallèles et disposées perpendiculairement à la plus grande dimension du local. Dans le cas du bureau ayant la meilleure performance acoustique (cloisonnettes d'une hauteur de 190 cm et de classe A associées à un plafond de classe A), la distance de distraction est de 3,4 m dans la longueur du bureau (sur la ligne de mesure P1). Mais étant donnée l'absence de cloisonnettes limitant la propagation de la parole dans la largeur du bureau, la distance de distraction, dans cette direction, est plutôt de l'ordre de 13 m.

Une manière encore très simplifiée de prendre en compte cette directionnalité de l'aménagement est de considérer que la zone de gêne définie par la distance de distraction est une ellipse, plutôt qu'un cercle, dont les dimensions (demi-grand axe et demi-petit axe) sont égales à la distance de distraction évaluée dans deux directions perpendiculaires. La Figure IV-1 met en lumière la différence entre l'approche prise par la norme ISO 3382-3 et une approche prenant en considération la directionnalité de l'aménagement. Dans cet exemple, la norme considère que six personnes sont gênées par le locuteur considéré, tandis que l'approche prenant en compte la directionnalité de l'aménagement conclura que ce nombre s'élève à treize, soit près du double.

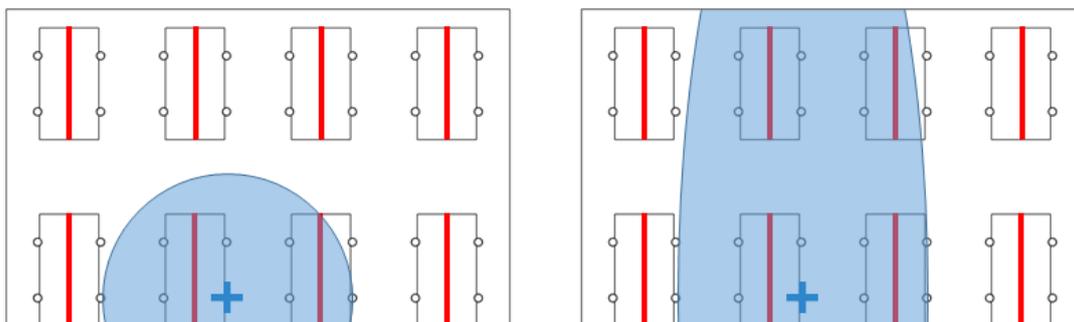


Figure IV-1 : Zone perturbée par le locuteur (croix) suivant l'ISO 3382-3 (gauche) et en prenant en compte la « directionnalité » de l'aménagement du bureau (droite) dans le cas étudié dans le Chapitre I (configuration : cloisonnettes de classe A d'une hauteur de 190 cm associée à un plafond de classe A). Les traits rouges représentent les cloisonnettes acoustiques et les cercles noirs correspondent aux postes de travail.

Finalement, pour caractériser fidèlement l'aménagement acoustique d'un bureau, il faudrait mesurer les indicateurs de la norme ISO 3382-3 le long de plusieurs lignes de mesure éloignées des murs et idéalement dans plusieurs directions dans le cas d'un aménagement anisotrope. La procédure de mesure est donc réellement applicable uniquement dans les grands bureaux dans lesquels autant l'aménagement que l'activité sont homogènes car il faut pouvoir tracer plusieurs lignes reliant au moins cinq postes de travail distants des murs.

IV.2. Lien entre performance du local et qualité de l'environnement sonore

La caractérisation des performances acoustiques du local n'est pas une finalité, elle donne une idée du potentiel du local à produire un environnement sonore propice au travail : la qualité acoustique d'un bureau doit, *in fine*, être définie au regard de la perception par les utilisateurs. Un environnement de bonne qualité acoustique est un environnement dans lequel les personnes ne sont pas, ou que très peu, gênées par l'environnement sonore.

Afin de mettre en évidence un éventuel lien entre les indicateurs caractérisant la performance acoustique d'un bureau et les effets délétères du bruit ressentis par les utilisateurs, il existe deux possibilités :

- Réaliser une étude en laboratoire : il faut alors s'assurer que les résultats obtenus sont transposables sur le terrain.
- Une enquête de terrain : elle consiste à réaliser, dans un ensemble de bureaux ouverts, une évaluation subjective, auprès des utilisateurs, de l'environnement sonore et de mesurer les indicateurs acoustiques de la norme ISO 3382-3. Il s'agit ensuite de chercher des liens entre les mesures et l'évaluation subjective.

Il n'est pas aisé de réaliser une enquête sur le terrain évaluant à la fois la performance objective d'un bureau et le ressenti des utilisateurs. En effet, il est nécessaire d'obtenir la participation active des entreprises. Afin de mettre en place la démarche, il faut que l'entreprise accepte, non seulement que les mesures objectives soient réalisées (et donc ouvrir ses locaux) en dehors des horaires de travail, mais aussi que ses salariés consacrent du temps de travail pour répondre aux questionnaires. C'est pourquoi il n'existe que peu de publications dans la littérature scientifique décrivant la mise en place de cette démarche au sein d'entreprises et qui permettent d'étudier le lien entre les indicateurs de la norme ISO 3382-3 et la

perception de l'environnement sonore par les utilisateurs. Trois études ont été identifiées dans la littérature : Haapakangas *et al* [55], Chevret *et al.* [53] et Mueller *et al.* [88].

Haapakangas *et al.* décrit une enquête réalisée au sein de 21 bureaux ouverts, dans lesquels l'activité réalisée est non-collaborative (les centres d'appels et les bureaux dans lesquels il y a un brouhaha constant ont été exclus de cette enquête par les auteurs). Les open-spaces ont été caractérisés à l'aide des indicateurs de la norme ISO 3382-3 et le bruit de fond (L_B) lié au système de ventilation a également été mesuré. La perception de l'environnement sonore par les utilisateurs des bureaux a été évaluée à l'aide de deux questions concernant la gêne ressentie liée au bruit dans sa globalité et celle liée spécifiquement aux conversations. Cette évaluation a été réalisée à l'aide d'échelles de Likert à cinq points allant de « 1 – Pas du tout gêné(e) » à « 5 – Très fortement gêné(e) ». Les réponses des participants (entre 6 et 131 par bureau) ont été recodées sur une échelle binaire : « faiblement gêné(e) » (réponses 1, 2 et 3) et « fortement gêné(e) » (réponse 4 et 5). Enfin, pour chaque bureau, les proportions de répondants fortement gênés par le bruit (HDN) et par les discussions (HDS) ont été évaluées.

Chevret *et al.* présente une enquête réalisée dans 16 bureaux ouverts (11 centres d'appels et 5 bureaux consacrés à une activité non-collaborative). Les bureaux ont été caractérisés à l'aide des indicateurs de la norme ISO 3382-3. Le niveau du bruit de fond (L_B) lié au système de ventilation et celui du bruit ambiant (L_{Aeq}) lors d'une journée de travail ont également été mesurés. Deux aspects de la gêne ressentie ont été évalués : la gêne liée au bruit en général et la gêne due aux bruits de parole. Dans chaque bureau, entre 11 et 108 personnes ont répondu au questionnaire. La gêne a été évaluée à l'aide de deux questions : « De façon générale, vous diriez que votre environnement de travail est gênant » et « Vous diriez que les bruits de conversations sont gênants ». Les réponses des participants étaient données sur une échelle de Likert à cinq points allant de « 1 – Pas du tout » à « 5 – Tout à fait ». Ces réponses ont pu être transformées, de la même manière que Haapakangas *et al.* [4], afin d'obtenir, pour chaque bureau, les proportions de répondants fortement gênés par le bruit (HDN) et par les discussions (HDS).

Mueller *et al.* présente une enquête réalisée dans six bureaux ouverts. Contrairement aux deux enquêtes précédentes, celle-ci n'évalue pas la gêne ressentie par les utilisateurs mais leur satisfaction vis-à-vis de l'environnement sonore. Cette enquête met en évidence de fortes corrélations entre cette satisfaction et les indicateurs de la norme ISO3382-3. Ces corrélations s'expliquent par le fait que cinq des six bureaux sont très similaires en termes de performance acoustique et de satisfaction et le dernier est significativement différents (voir Figure IV-2). C'est donc ce sixième bureau qui crée les corrélations. Cette enquête n'a donc pas été conservée pour des analyses plus détaillées.

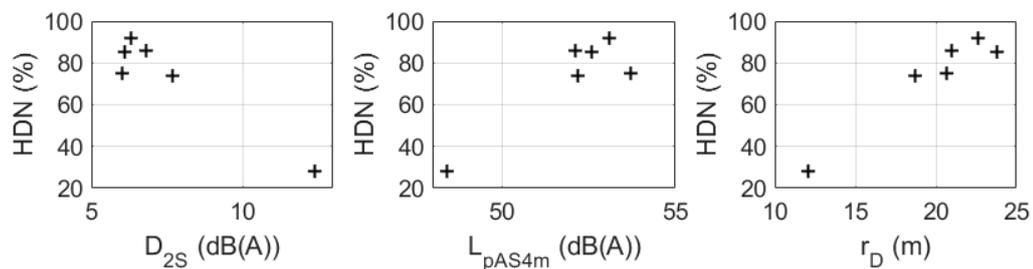


Figure IV-2 : Proportion de répondants fortement gênés par le bruit (HDN) en fonction des indicateurs de la norme ISO 3382-3 d'après Mueller *et al.* [88].

Dans un premier temps, les deux enquêtes considérées ici mettent en évidence que la gêne liée au bruit dans les bureaux ouverts est intimement liée à la gêne liée aux conversations. La Figure IV-3 représente, pour les deux études considérées, HDN en fonction de HDS. Sur cette figure, est également représentée la régression linéaire évaluées sur l'ensemble des 37 bureaux. Cette régression met en évidence le fait que HDS explique près des deux tiers (63 %) des variations de HDN. Cette observation rejoint Pierrette *et al.* [3] qui concluent que les conversations constituent la source de gêne la plus importante dans les bureaux ouverts.

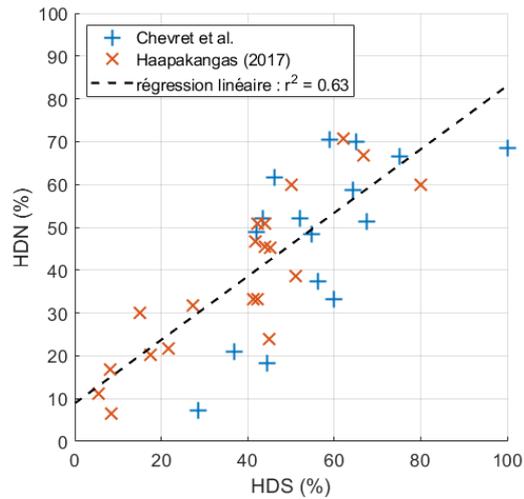


Figure IV-3 : Lien entre la proportion de personnes fortement gênées par le bruit (HDN) et celle par les discussions (HDS)

La Figure IV-4 représente la proportion de personnes fortement gênées par les conversations, en fonction des différents indicateurs objectifs mesurés dans les bureaux vides des utilisateurs. Sur les différents graphes, les points correspondants aux bureaux des deux enquêtes sont représentés accompagnés de la régression linéaire obtenue pour chaque enquête. Les coefficients de corrélation entre les indicateurs et HDS, et les p-valeurs associées, sont présentés Tableau IV-1.

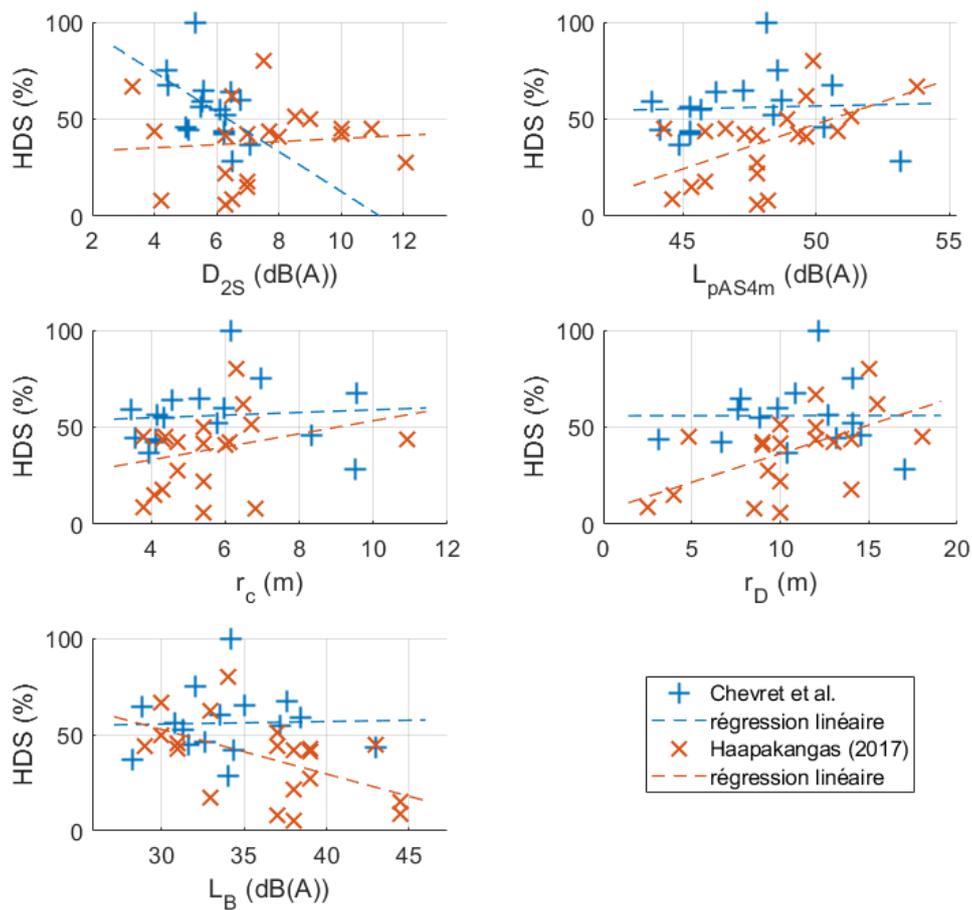


Figure IV-4 : Représentation de la proportion de personnes se disant fortement gênées par les conversations (HDS) en fonction des indicateurs du local à vide.

	Haapakangas et al. [55]		Chevret et al. [53]	
	r	p-valeur	r	p-valeur
D_{2S}	0,084	0,724	- 0,484	0,058
L_{pAS4m}	0,572	0,009	0,045	0,868
r_c	0,401	0,080	0,081	0,765
r_D	0,542	0,014	0,002	0,995
L_B	- 0,516	0,02	0,030	0,913

Tableau IV-1 : coefficients de corrélation entre HDS et les indicateurs mesurés dans un bureau vide (et p-valeurs associées) pour les deux enquêtes considérées

L'étude de Haapakangas *et al.* met en évidence un lien entre HDS et L_{pAS4m} , r_D et L_B . Cependant, les auteurs affirment que la corrélation entre HDS et L_{pAS4m} est due à un point de mesure aberrant. Aussi, ils ne retiennent que les corrélations de HDS avec r_D et L_B , qui vont dans le sens des observations faites en laboratoire liant la gêne due aux conversations à l'intelligibilité de la parole. Une augmentation du bruit de fond

entraîne une diminution de l'intelligibilité de la parole et donc de la gêne (d'où la corrélation négative avec HDS) et une augmentation de r_D traduisant une augmentation du nombre de personnes gênée autour d'un locuteur (d'où la corrélation positive avec HDS).

Suite à leur enquête, Haapakangas et ses collègues concluent que les indicateurs caractérisant la décroissance spatiale du niveau de la parole ne sont pas liés à la perception de l'environnement sonore et recommandent donc de préférer la mesure de r_D à celle de D_{2S} et L_{pAS4m} . Cependant, il faut noter que r_D prend en compte la décroissance spatiale du bruit de parole et le bruit de fond, ce que ne fait pas l'approche basée sur la décroissance spatiale du champ de pression. Cependant, il est possible de prendre en compte ces deux aspects en construisant, à partir de la D_{2S} , du L_{pAS4m} et de L_B , un rapport signal sur bruit d'après l'équation (Eq. IV-1).

$$SNR(r) = L_{pAS}(r) - L_B = L_{pAS4m} - D_{2S} \cdot \log_2\left(\frac{r}{4}\right) - L_B \quad (\text{Eq. IV-1})$$

Il est alors possible de faire varier r afin de maximiser le coefficient de corrélation entre $SNR(r)$ et HDS. Cet optimum est le SNR estimé à $r = 2,4$ m ($r = 0,653 - p = 0,002$), qui explique 43 % des variations de HDS, contre 29 % pour r_D (voir Figure IV-5). Il apparaît donc que les deux approches de la norme ISO 3382-3 (mesure de r_D ou de D_{2S} , L_{pAS4m} et r_c) sont pertinents pour évaluer la gêne ressentie par les utilisateurs des bureaux ouverts.

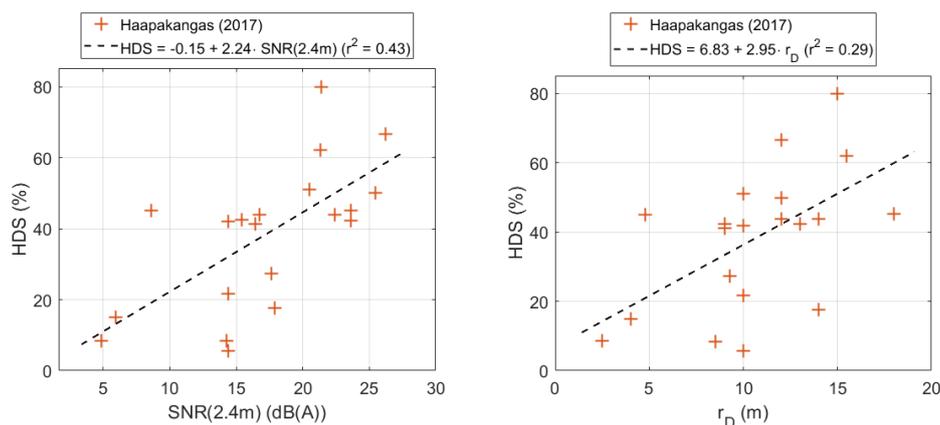


Figure IV-5 : HDS en fonction du SNR estimé à 2,4 m (à gauche) et de r_D (à droite) pour les données de Haapakangas et al.

Contrairement à celle menée par Haapakangas *et al.*, l'enquête de Chevret *et al.* ne met en évidence aucune corrélation significative entre les indicateurs caractérisant les performances acoustiques des bureaux ouverts et HDS.

Ces différences dans les conclusions des deux enquêtes peuvent s'expliquer par le panel de bureaux utilisés dans chacune d'elle : Haapakangas *et al.* comprend des bureaux dans lesquels l'activité est non-collaborative tandis que Chevret *et al.* comprend une majorité de centres d'appels.

Aussi, dans Haapakangas *et al.* l'environnement sonore des bureaux est très calmes, quasi-identique en l'absence et en présence des occupants : il est composé du bruit du système de ventilation, auquel s'ajoute occasionnellement un bruit de parole. Cet environnement sonore est aussi très proche de celui reconstitué dans les études sur l'ISE (une voix perturbatrice masquée par un bruit pseudo-aléatoire stationnaire), ce qui explique que les résultats obtenus par Haapakangas et ses collègues [55] soient aussi proches de ceux obtenus en laboratoire. Ce type d'environnement n'est par contre pas très représentatif du parc des open-spaces français.

À l'inverse, l'environnement sonore des bureaux inclus dans l'enquête menée par Chevret *et al.* est caractérisé par un brouhaha presque continu (qui domine complètement l'environnement des bureaux vides). Cela explique que le bruit de fond ne soit pas corrélé à la perception de l'environnement sonore dans l'étude de Chevret *et al.* contrairement au niveau du bruit ambiant (L_{Aeq}) mesuré lors d'une journée de travail (corrélation entre HDN et L_{Aeq} : $r=0,51$ – $p=0,046$).

Il ressort donc de ces deux enquêtes qu'il est primordial de prendre en compte l'activité réalisée dans un bureau lors de la définition de la qualité acoustique de celui-ci. La caractérisation de la performance acoustique du local reste tout de même importante car elle permet d'expliquer une part non-négligeable de la perception de l'environnement sonore par les utilisateurs des bureaux : les indicateurs de la norme ISO 3382-3 peuvent expliquer jusqu'à 43 % des variations de la proportion de personnes fortement gênées par les conversations.

Il est possible de résumer les résultats et la comparaison des enquêtes menées par Haapakangas *et al.* et Chevret *et al.* comme suit : si une bonne performance

acoustique du local est nécessaire, elle n'assure pas une absence de gêne auprès des utilisateurs du bureau ouvert. En effet, de nombreux facteurs non-acoustiques entrent en jeu dans la perception de l'environnement sonore, le plus important d'entre eux étant l'activité réalisée par les personnes exposées au bruit.

IV.3. Qualité acoustique des bureaux ouverts

La norme ISO 22955 donne des recommandations permettant d'atteindre une bonne qualité acoustique de l'environnement de travail. La norme place l'activité réalisée dans le bureau au centre de son approche et définit deux cas de figure : soit l'activité est homogène à travers l'ensemble du bureau, soit plusieurs activités différentes y cohabitent.

Dans le premier cas, la norme classe les activités en quatre types :

- Les activités axées sur la communication avec l'extérieur. Les centres d'appels sont inscrits dans cette catégorie.
- Les activités basées sur un travail collaboratif réalisé en équipes regroupées dans le bureau.
- Les activités basées sur un travail non-collaboratif.
- Les activités qui impliquent l'accueil du public.

Pour chacune de ces activités, la norme recommande d'atteindre des valeurs cibles sur un ensemble d'indicateurs acoustiques. Ces indicateurs sont ceux de la norme ISO 3382-3 auxquels s'ajoutent le niveau du bruit ambiant, mesuré en conditions d'utilisation normale du bureau, et la D_{AS} qui caractérise l'atténuation du niveau de la parole entre deux postes de travail.

Lorsque plusieurs activités cohabitent au sein d'un même espace de travail, la norme ISO 22955 recommande une atténuation de la parole entre les zones occupées par les différentes activités. Ces recommandations sont faites à l'aide de la D_{AS} , qui, dans ce cas, se mesure entre deux postes de travail appartenant à deux zones dans lesquelles l'activité diffère (cette approche est présentée dans le détail dans le chapitre II).

La D_{AS} , qui a été introduit par la norme ISO 22955 (2021), suit une procédure de mesure extrêmement simple : c'est une mesure de l'atténuation du niveau pondéré A de la parole entre deux points du bureau. Cette particularité (par rapport aux

indicateurs de la norme ISO 3382-3) lui offre une grande flexibilité et permet de réaliser la mesure quelle que soit la taille du bureau ouvert et quelle que soit l'homogénéité de l'aménagement.

Les simulations réalisées dans le Chapitre II permettent d'évaluer l'incertitude de mesure de la D_{AS} . En effet, pour chacun des postes de travail, il est possible d'évaluer l'atténuation du niveau pondéré A de la parole (au lieu d'évaluer simplement le niveau de la parole ou le STI). On obtient ainsi 448 mesures de la D_{AS} (16 configurations acoustiques x 4 lignes de mesure x 7 postes de travail) auxquelles sont associées des valeurs d'incertitude de mesure. Ces valeurs d'incertitudes obtenues à l'aide des simulations réalisées dans le Chapitre II sont représentées Figure IV-6. Il apparaît sur cette figure que l'incertitude de mesure de la D_{AS} est comprise entre 0,7 et 0,8 dB(A). Ces valeurs sont cohérentes avec la norme ISO 9612 (2009) [89] qui indique que l'incertitude de la mesure du niveau pondéré A d'un bruit industriel à l'aide d'un microphone de classe 1 est égale à 0,7 dB(A).

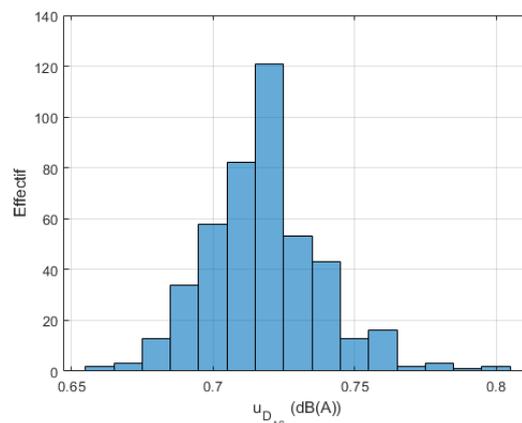


Figure IV-6 : Incertitudes de mesure de la D_{AS} obtenues à l'aides des simulations du chapitre I

Cependant, cette démarche basée sur le D_{AS} présente une lacune majeure : comme indiqué dans le Chapitre III, les valeurs cibles recommandées par la norme ISO 22955, représentées Tableau III-3 avaient besoin d'être consolidées.

Ce constat a motivé la réalisation de l'expérience de laboratoire présentée dans le Chapitre III. L'expérience se concentrait sur les effets délétères d'un bruit de parole, provenant d'un espace de pause ou d'un centre d'appels, perçus par des personnes réalisant une activité individuelle nécessitant un effort de concentration important. L'expérience a mis en évidence que les deux activités perturbatrices (espace de pause

et centre d'appels) entraînent des effets significativement différents uniquement lorsque la parole qu'elles émettent est intelligible à la position des personnes perturbées. Cette conclusion est en désaccord avec les hypothèses de la norme ISO 22955. C'est effectivement ce qui apparaît sur la Figure IV-7 qui représente le pourcentage de sujets ayant caractérisé l'environnement sonore de fortement gênant, fortement bruyant et fortement fatigant lors de l'expérience.

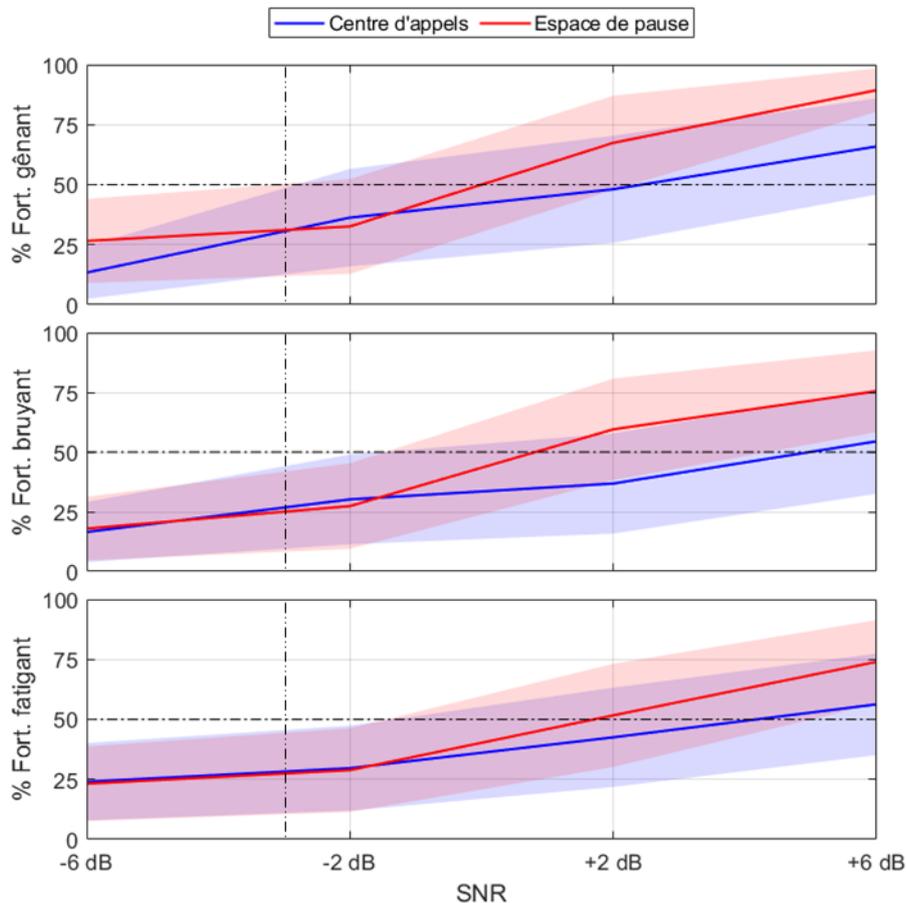


Figure IV-7 : Proportions des participant ayant caractérisée les différentes conditions expérimentales de fortement gênante, bruyante et fatigante (valeur moyenne et écart-type)

D'après la Figure IV-7, lorsque le SNR (différence entre le niveau de la parole perturbatrice et le niveau du bruit ambiant propre à l'activité perturbée) est inférieur à -3 dB, moins de 50 % des participants ont jugé que l'environnement sonore était fortement gênant, bruyant ou fatigant. Aussi, si l'on suppose que ce critère est acceptable pour la normalisation, une valeur cible de -3 dB pour le SNR est pertinente.

Pour définir les valeurs cibles de la D_{AS} , la norme ISO 22955 utilise la relation (Eq. IV-2), qui lie la valeur cible de la D_{AS} avec la valeur cible du SNR, le niveau de la

parole perturbatrice mesuré à un mètre (L_{pAS1m}) et le niveau du bruit ambiant propre à l'activité perturbée (L_{Aeq}).

$$D_{AS}^{cible} = L_{pAS1m} - L_{Aeq} - SNR^{cible} \quad (\text{Eq. IV-2})$$

Pour une activité perturbée donnée, la norme ISO 22955 différenciait les activités perturbatrices par l'intermédiaire de la valeur cible du SNR, ce qui d'après les résultats de l'expérience de laboratoire, ne semble pas pertinent.

Les résultats obtenus dans ce travail nous amènent à proposer d'autres valeurs cible du D_{AS} pour la normalisation. Tout d'abord, nous considérons que la valeur cible du SNR est commune à l'ensemble des couples d'activités perturbatrice/perturbée. Ensuite, en suivant les travaux de Pearsons *et al.* [90], nous considérons que le niveau de la parole perturbatrice mesuré à un mètre est dépendant de l'activité perturbatrice. Il paraît pertinent, par exemple, de considérer qu'une personne parle plus fort dans un espace de pause que dans un bureau calme.

Aussi, les hypothèses sur l'effort de parole peuvent se traduire comme suit :

- Dans un espace de pause, un effort élevé (*raised vocal effort*) est utilisé :
 $L_{pAS1m} = 63,6 \text{ dB(A)}$.
- Pour les activités pour lesquelles la parole est utilisée (centre d'appels, collaboratif et réunions), un effort normal (*normal vocal effort*) est utilisé :
 $L_{pAS1m} = 57,4 \text{ dB(A)}$.
- Pour les activités pour lesquelles la parole n'est pas nécessaire, un effort léger (*casual vocal effort*) est utilisé : $L_{pAS1m} = 51,1 \text{ dB(A)}$.

Enfin, les hypothèses faites par la norme ISO 22955 concernant les niveaux des bruits ambiants propres aux différentes activités, qui se basent initialement sur les recommandations de la norme française NF S31-199, sont conservées.

En faisant ces hypothèses sur les niveaux de parole et de bruits ambiants pour les différents types d'activités, il est possible de calculer les valeurs cibles de D_{AS} pour chaque couple d'activités perturbée/perturbatrice en utilisant la relation (Eq. IV-2) dans laquelle SNR_{cible} est considéré égal à -3 dB. Ces valeurs cibles de D_{AS} sont présentées Tableau IV-2 (les valeurs obtenues à l'aide de la relation (Eq. IV-2) ont été arrondies au décibel supérieur). Dans le Tableau IV-2, la différence entre les valeurs cibles

En ce qui concerne la différence entre les valeurs cibles proposées ici et celles présentes dans la norme ISO 22955, deux tendances apparaissent : pour les activités pour lesquelles la parole est très présente (réunion, centres d'appels et travail collaboratif), les nouvelles valeurs cibles sont supérieures à celles existantes, tandis que pour les activités qui ne nécessitent pas (ou peu) de communication, les nouvelles valeurs cibles sont inférieures à celles existantes dans la norme ISO 22955.

Cette différence entre les deux tendances s'explique peut-être par le fait que lors de l'expérience de laboratoire, l'activité réalisée par les participants était une tâche individuelle nécessitant un effort de concentration. Il est donc possible que la valeur cible du SNR qui découle de l'expérience soit inadaptée aux activités basées sur la communication (réunion, centre d'appels et travail collaboratif) qui sont, d'après Harvie-Clark *et al.*, moins sensible au bruit de parole perturbateurs : un SNR supérieur à -3 dB, et donc des valeurs cibles de D_{AS} plus basses pourraient convenir.

Aussi, si l'atténuation du niveau pondéré A de la parole (D_{AS}) paraît prometteuse pour assurer un bureau de bonne qualité acoustique, de nombreux travaux de recherche sont encore nécessaires pour affiner sa définition et la recommandation de valeurs cibles adaptées. Ces valeurs cibles doivent, en effet, être suffisamment élevées afin de minimiser les effets délétères du bruit mais elles ne doivent pas être trop élevées, au risque d'engendrer des coûts « inutiles » lors de l'aménagement d'un bureau ouvert.

Conclusion et perspectives

Cette thèse avait pour objectif de combler les lacunes du cadre normatif de l'évaluation de la performance acoustique et de la qualité de l'environnement sonore des bureaux ouverts.

Une étude des incertitudes de mesure des indicateurs caractérisant la performance acoustique des bureaux ouverts a été réalisée. Des expressions analytiques de ces incertitudes ont été développées. Ces expressions se sont avérées être trop complexes pour envisager de les intégrer dans la prochaine révision de la norme ISO 3382-3, c'est pourquoi une démarche de simplification, sur la base de mesure réalisée sur le terrain a été mise en place. Ces simplifications permettent d'envisager l'introduction d'expressions analytiques des incertitudes de mesure dans la norme : les expressions ont fortement perdu en complexité, sans que leur précision ne soit significativement impactée. Il reste néanmoins nécessaire de les consolider élargissant la base de données expérimentale, idéalement en incluant des données d'autres laboratoires, afin de généraliser au maximum les simplifications.

Une évaluation des incertitudes de mesure a également été réalisée dans le cas d'un aménagement de bureau décliné en 16 configurations acoustiques. Ces simulations ont mis en évidence que l'ordre de grandeur des incertitudes des indicateurs de la norme ISO 3382-3 (2022) sont faibles. Cependant, il est apparu que les indicateurs pouvaient, dans certains cas, dépendre fortement de la ligne de mesure choisie. Aussi, il semble problématique de décrire un bureau à l'aide d'une valeur unique de ces indicateurs, comme le recommande aujourd'hui la norme ISO 3382-3 (2022). Il paraît plus pertinent de recommander un nombre de mesures qui dépend du nombre de postes de travail dans le bureau, à la manière de la norme VDI 2569 (2019).

La norme ISO 22955 (2021), qui fait des recommandations sur la performance acoustique des bureaux ouverts, introduit un nouvel indicateur : l'atténuation entre deux postes de travail du niveau pondéré A de la parole, noté D_{As} . Cet indicateur est au centre d'une nouvelle démarche d'évaluation de la qualité acoustique des bureaux ouverts qui est spécifique aux bureaux dans lesquels cohabitent des activités de natures différentes. La norme recommande un certain isolement entre les zones dans

lesquelles l'activité réalisée diffère. Cette isolement est caractérisé à l'aide du D_{AS} et la norme recommande des valeurs cibles qui dépendent des deux activités considérées (une activité perturbatrice et une activité perturbée). Cependant, les développements ayant aboutis à ces valeurs cibles semblent reposés sur des bases scientifiques fragiles qu'il convient de consolider.

Dans ce but, une expérience de laboratoire a été réalisée. Cette expérience avait pour objectif de mettre en évidence un éventuel lien entre les effets délétères du bruit et la nature de l'activité perturbatrice. Huit conditions sonores ont été considérées. Elles étaient constituées d'un bruit de parole, provenant d'un espace de pause ou d'un centre d'appels, et d'un environnement sonore « propre » à une activité individuelle qui nécessite un effort de concentration important (environnement calme constitué d'un bruit de ventilation et de bruits de claviers et de souris d'ordinateur). Cette superposition a été faite suivant quatre rapport signal sur bruit (différence entre le niveau de parole et le niveau du bruit de ventilation) compris entre -6 dB et +6 dB. 32 sujets ont participé à l'expérience. Ils devaient, dans chacune des conditions, réaliser une tâche de revue de presse pendant 35 min, à la suite de quoi, leur perception de l'environnement sonore, leur fatigue ressentie et la charge mentale de travail étaient évaluées à l'aide de questionnaire. Les résultats mettent en évidence que la nature de l'activité perturbatrice n'impacte significativement les effets délétères du bruit que lorsque la parole est intelligible (SNR supérieur à 0 dB). Ces résultats ont permis de proposer de nouvelles valeurs cibles pour le D_{AS} qui pourraient être intégrées à la norme ISO 22955 lors de sa prochaine révision. Ces valeurs cibles reposent cependant sur l'expérience de laboratoire qui se limite à une unique activité perturbée (travail individuel focalisé), il est donc possible qu'elles ne soient pas idéales pour d'autres activités perturbées étant donné que la perception de l'environnement sonore dépend fortement de l'activité réalisée. Il est donc nécessaire d'évaluer la pertinence des valeurs cibles proposées pour le D_{AS} pour d'autres combinaisons d'activités perturbatrices/perturbées. Il est envisageable de le faire à l'aide d'expériences de laboratoire similaires à celle réalisée durant cette thèse. Une autre possibilité consiste en la réalisation de mesures en entreprises : il s'agirait alors de mesurer le D_{AS} dans des bureaux multi-activités et d'évaluer la perception de l'environnement sonore par les personnes y travaillant.

Dans le contexte de la prévention et de normalisation, dans lequel s'inscrit cette thèse, les travaux réalisés apportent des éléments nouveaux qui permettront d'améliorer le cadre normatif de l'évaluation de la qualité acoustique des bureaux ouverts. En effet, cette thèse propose des expressions analytiques des incertitudes de mesure qui pourront être intégrées à lors de la prochaine révision de la norme ISO 3382-3 qui devrait avoir lieu horizon 2027. Cette thèse propose également de nouvelles valeurs cibles, justifiées scientifiquement, pour la caractérisation de la qualité acoustique des bureaux ouverts hébergeant plusieurs activités différentes (type d'aménagement qui est de plus en plus présent au sein des entreprises françaises).

Références

- [1] Sundstrom E, Town JP, Rice RW, Osborn DP, Brill M. Office noise, satisfaction and performance. *Environment and Behavior* 1994;26:195–222.
- [2] Amstutz S, Kündig S, Monn C. Étude SBiB : Enquête suisse dans les bureaux 2010.
- [3] Pierrette M, Parizet E, Chevret P, Chatillon J. Noise effect on comfort in open-space offices: development of an assessment questionnaire. *Ergonomics* 2015;58:96–106. <https://doi.org/10.1080/00140139.2014.961972>.
- [4] ISO 3382-3:2022 - Acoustics - Measurement of room acoustic parameters - Part 3: Open plan offices. The International Organization for Standardization (ISO) 2022.
- [5] ISO 22955:2021 - Acoustics - Acoustic quality of open office spaces. The International Organization for Standardization (ISO) 2021.
- [6] Haapakangas A, Hongisto V, Liebl A. The relation between the intelligibility of irrelevant speech and cognitive performance—A revised model based on laboratory studies. *Indoor Air* 2020;30:1130–46. <https://doi.org/10.1111/ina.12726>.
- [7] French NR, Steinberg JC. Factors Governing the Intelligibility of Speech Sounds. *The Journal of the Acoustical Society of America* 1947;19:90–119.
- [8] ANSI S3.5-1997 (R2007) : Methods for calculation of the speech intelligibility index. The American Standards Institute 1997.
- [9] Steeneken HJM, Houtgast T. A physical method for measuring speech-transmission quality. *The Journal of the Acoustical Society of America* 1980;67:318–26. <https://doi.org/10.1121/1.384464>.
- [10] Steeneken HJM, Houtgast T. Mutual dependence of the octave-band weights in predicting speech intelligibility. *Speech Communication* 1999;28:109–23. [https://doi.org/10.1016/S0167-6393\(99\)00007-2](https://doi.org/10.1016/S0167-6393(99)00007-2).
- [11] IEC 60268-16:2020 - Sound system equipment. Part 16: Objective rating of speech intelligibility by speech transmission index. European Committee for Electrotechnical Standardization (CENELEC) 2020.
- [12] Salamé P, Baddeley A. Disruption of short-term memory by unattended speech: Implications for the structure of working memory. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior* 1982;21:150–64. [https://doi.org/10.1016/S0022-5371\(82\)90521-7](https://doi.org/10.1016/S0022-5371(82)90521-7).
- [13] Jones DM, Macken WJ. Irrelevant Tones Produce an Irrelevant Speech Effect: Implications for Phonological Coding in Working Memory. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory and Cognition* 1993;19:369–81.

- [14] Jones DM, Macken WJ, Murray AC. Disruption of visual short-term memory by changing-state auditory stimuli: The role of segmentation. *Mem Cogn* 1993;21:318–28. <https://doi.org/10.3758/BF03208264>.
- [15] Jones D, Madden C, Miles C. Privileged Access by Irrelevant Speech to Short-term Memory: The Role of Changing State. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology Section A* 1992;44:645–69. <https://doi.org/10.1080/14640749208401304>.
- [16] Haka M, Haapakangas A, Keränen J, Hakala J, Keskinen E, Hongisto V. Performance effects and subjective disturbance of speech in acoustically different office types - a laboratory experiment: Performance effects and subjective disturbance of speech. *Indoor Air* 2009;19:454–67. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2009.00608.x>.
- [17] Haapakangas A, Kankkunen E, Hongisto V, Virjonen P, Oliva D, Keskinen E. Effects of Five Speech Masking Sounds on Performance and Acoustic Satisfaction. Implications for Open-Plan Offices. *Acta Acustica United with Acustica* 2011;97:641–55. <https://doi.org/10.3813/AAA.918444>.
- [18] Keus van de Poll M, Carlsson J, Marsh JE, Ljung R, Odelius J, Schlittmeier SJ, et al. Unmasking the effects of masking on performance: The potential of multiple-voice masking in the office environment. *The Journal of the Acoustical Society of America* 2015;138:807–16. <https://doi.org/10.1121/1.4926904>.
- [19] Ebissou A, Parizet E, Chevret P. Use of the Speech Transmission Index for the assessment of sound annoyance in open-plan offices. *Applied Acoustics* 2015;88:90–5. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2014.07.012>.
- [20] Liebl A, Assfalg A, Schlittmeier SJ. The effects of speech intelligibility and temporal–spectral variability on performance and annoyance ratings. *Applied Acoustics* 2016;110:170–5. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2016.03.019>.
- [21] Hongisto V, Varjo J, Leppämäki H, Oliva D, Hyönä J. Work performance in private office rooms: The effects of sound insulation and sound masking. *Building and Environment* 2016;104:263–74. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.04.022>.
- [22] Renz T, Leistner P, Liebl A. Auditory distraction by speech: Can a babble masker restore working memory performance and subjective perception to baseline? *Applied Acoustics* 2018;137:151–60. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2018.02.023>.
- [23] Renz T, Leistner P, Liebl A. The Effect of Spatial Separation of Sound Masking and Distracting Speech Sounds on Working Memory Performance and Annoyance. *Acta Acustica United with Acustica* 2018;104:611–22. <https://doi.org/10.3813/AAA.919201>.
- [24] Jahncke H, Hongisto V, Virjonen P. Cognitive performance during irrelevant speech: Effects of speech intelligibility and office-task characteristics. *Applied Acoustics* 2013;74:307–16. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2012.08.007>.

- [25] Brocolini L, Parizet E, Chevret P. Effect of masking noise on cognitive performance and annoyance in open plan offices. *Applied Acoustics* 2016;114:44–55. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2016.07.012>.
- [26] Kostallari K, Parizet E, Chevret P, Amato J-N, Galy E. Irrelevant speech effect in open plan offices: Comparison of two models explaining the decrease in performance by speech intelligibility and attempt to reduce interindividual differences of the mental workload by task customisation. *Applied Acoustics* 2020;161:107180. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2019.107180>.
- [27] Hongisto V. A model predicting the effect of speech of varying intelligibility on work performance. *Indoor Air* 2005;15:458–68. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2005.00391.x>.
- [28] Cabrera D, Yadav M, Protheroe D. Critical methodological assessment of the distraction distance used for evaluating room acoustic quality of open-plan offices. *Applied Acoustics* 2018;140:132–42. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2018.05.016>.
- [29] ISO 14257:2002 - Acoustics - Measurement and parametric description of spatial sound distribution curves in workrooms for evaluation of their acoustical performance. The International Organization for Standardization (ISO) 2002.
- [30] Virjonen P, Keränen J, Hongisto V. Determination of Acoustical Conditions in Open-Plan Offices: Proposal for New Measurement Method and Target Values. *Acta Acustica United with Acustica* 2009;95:279–90. <https://doi.org/10.3813/AAA.918150>.
- [31] Hongisto V, Keränen J. Comfort Distance—A Single-Number Quantity Describing Spatial Attenuation in Open-Plan Offices. *Applied Sciences* 2021;11:4596. <https://doi.org/10.3390/app11104596>.
- [32] Nilsson E, Hellström B. Room Acoustic Design in Open-Plan Offices. 10ème Congrès Français d'Acoustique, Lyon, France: 2010.
- [33] Veitch JA, Bradley JS, Legault LM, Norcross SG, Svec JM. Masking Speech in Open-Plan Offices with Simulation Ventilation Noise: Noise-Level and Spectral Composition Effects on Acoustic Satisfaction. National Research Council Canada; 2002.
- [34] Hongisto V, Keränen J, Labia L, Alakoivu R. Precision of ISO 3382-2 and ISO 3382-3 – A Round-Robin test in an open-plan office. *Applied Acoustics* 2021;175:107846. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2020.107846>.
- [35] Evans GW, Johnson D. Stress and open-office noise. *Journal of Applied Psychology* 2000;85:779–83. <https://doi.org/10.1037/0021-9010.85.5.779>.
- [36] Jahncke H, Hygge S, Halin N, Green AM, Dimberg K. Open-plan office noise: Cognitive performance and restoration. *Journal of Environmental Psychology* 2011;31:373–82. <https://doi.org/10.1016/j.jenvp.2011.07.002>.

- [37] Jahncke H, Halin N. Performance, fatigue and stress in open-plan offices: The effects of noise and restoration on hearing impaired and normal hearing individuals. *Noise Health* 2012;14:260. <https://doi.org/10.4103/1463-1741.102966>.
- [38] Wålander R, Gunnarsson K, Runeson R, Smedje G. Physiological and psychological stress reactions in relation to classroom noise. *Scand J Work Environ Health* 2007;33:260–6. <https://doi.org/10.5271/sjweh.1141>.
- [39] Abbasi AM, Motamedzade M, Aliabadi M, Golmohammadi R, Tapak L. Study of the physiological and mental health effects caused by exposure to low-frequency noise in a simulated control room. *Building Acoustics* 2018;25:233–48. <https://doi.org/10.1177/1351010X18779518>.
- [40] Kjellberg A, Landström U, Tesarz M, Söderberg L, Akerlund E. The effects of nonphysical noise characteristics, ongoing task and noise sensitivity on annoyance and distraction due to noise at work. *Journal of Environmental Psychology* 1996;16:123–36. <https://doi.org/10.1006/jevp.1996.0010>.
- [41] Kjellberg A, Tesarz M, Holmberg K, Landström U. Evaluation of frequency-weighted sound level measurements for prediction of low-frequency noise annoyance. *Environment International* 1997;23:519–27. [https://doi.org/10.1016/S0160-4120\(97\)00054-8](https://doi.org/10.1016/S0160-4120(97)00054-8).
- [42] Perrin Jegen N, Chevret P. Effect of noise on comfort in open-plan offices: application of an assessment questionnaire. *Ergonomics* 2017;60:6–17. <https://doi.org/10.1080/00140139.2016.1172737>.
- [43] Åhsberg E, Garnberale F, Kjellberg A. Perceived quality of fatigue during different occupational tasks Development of a questionnaire. *International Journal of Industrial Ergonomics* 1997;20:121–35. [https://doi.org/10.1016/S0169-8141\(96\)00044-3](https://doi.org/10.1016/S0169-8141(96)00044-3).
- [44] Tsao L, Chang J, Ma L. Fatigue of Chinese railway employees and its influential factors: Structural equation modelling. *Applied Ergonomics* 2017;62:131–41. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2017.02.021>.
- [45] Zare MR, Farhadi S, Ahmadi M, Tolooei F, Rahimpour R. Noise Pollution Effects on Mental Fatigue and Noise Annoyance among Bank Staffs 2019:11.
- [46] Kostallari K, Parizet E, Brocolini L, Judon N, Chevret P, Galy E. Compared effects of overall level and speech intelligibility on self-reported fatigue in open-plan offices: a laboratory study, *e-Forum Acusticum* 2020; 2020, p. 2 pages. <https://doi.org/10.48465/FA.2020.0944>.
- [47] Lenne L, Chevret P, Marchand J. Long-term effects of the use of a sound masking system in open-plan offices: A field study. *Applied Acoustics* 2020;158:107049. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2019.107049>.
- [48] Smets EMA, Garssen B, Bonke B, de Haes JCJM. The multidimensional Fatigue Inventory (MFI) psychometric qualities of an instrument to assess fatigue. *Journal of Psychosomatic Research* 1995;39:315–25. [https://doi.org/10.1016/0022-3999\(94\)00125-O](https://doi.org/10.1016/0022-3999(94)00125-O).

- [49] Smets EMA, Garssen B, Cull A, de Haes JCJM. Application of the multidimensional fatigue inventory (MFI-20) in cancer patients receiving radiotherapy 1996:5.
- [50] Gentile S, Delarozière JC, Favre F, Sambuc R, San Marco JL. Validation of the French “multidimensional fatigue inventory” (MFI 20). *Eur J Cancer Care* 2003;12:58–64. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2354.2003.00295.x>.
- [51] Hart SG, Staveland LE. Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of Empirical and Theoretical Research. *Advances in Psychology*, vol. 52. Elsevier Sciences, P.A. Hancock and N. Meshkati; 1988, p. 139–83. [https://doi.org/10.1016/S0166-4115\(08\)62386-9](https://doi.org/10.1016/S0166-4115(08)62386-9).
- [52] Galy E, Cariou M, Mélan C. What is the relationship between mental workload factors and cognitive load types? *International Journal of Psychophysiology* 2012;83:269–75. <https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2011.09.023>.
- [53] Chevret P, Bonzom T, Lenne L, Brocolini L, Marchand J. Field study for the evaluation of the acoustic quality of open-plan offices. *Inter Noise 2021*;263:2544–9. <https://doi.org/10.3397/IN-2021-2168>.
- [54] Yang W, Moon HJ. Combined effects of acoustic, thermal, and illumination conditions on the comfort of discrete senses and overall indoor environment. *Building and Environment* 2019;148:623–33. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.11.040>.
- [55] Haapakangas A, Hongisto V, Eerola M, Kuusisto T. Distraction distance and perceived disturbance by noise—An analysis of 21 open-plan offices. *The Journal of the Acoustical Society of America* 2017;141:127–36. <https://doi.org/10.1121/1.4973690>.
- [56] Lenne L, Chevret P, Parizet É. Measurement uncertainty and unicity of single number quantities describing the spatial decay of speech level in open-plan offices. *Applied Acoustics* 2021;182:108269. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2021.108269>.
- [57] Yadav M, Cabrera D, Love J, Kim J, Holmes J, Caldwell H, et al. Reliability and repeatability of ISO 3382-3 metrics based on repeated acoustic measurements in open-plan offices. *Applied Acoustics* 2019;150:138–46. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2019.02.010>.
- [58] Schneider M, Selzer J, Rissler J, Wolff A, Schelle F. Uncertainties of ISO 3382-3 sound pressure level quantities. *Acta Acust* 2021;5:27. <https://doi.org/10.1051/aacus/2021022>.
- [59] JCGM 100:2008 - Evaluation of measurement data - Guide to the expression of uncertainty in measurement. The Joint Committee for Guides in Metrology 2008.
- [60] IEC 61672-1:2003 - Electroacoustics - Sound level meters - Part 1: Specifications. European Committee for Electrotechnical Standardization (CENELEC) 2003.

- [61] ISO 3382-2:2010 - Acoustics - Measurement of room acoustic parameters - Part 2: Reverberation time in ordinary rooms. The International Organization for Standardization (ISO) 2010.
- [62] Ondet AM, Barbry JL. Modeling of sound propagation in fitted workshops using ray tracing. *The Journal of the Acoustical Society of America* 1989;85:787–96. <https://doi.org/10.1121/1.397551>.
- [63] Chevret P, Chatillon J. Implementation of diffraction in a ray-tracing model for the prediction of noise in open-plan offices. *The Journal of the Acoustical Society of America* 2012;132:3125–37. <https://doi.org/10.1121/1.4754554>.
- [64] Chevret P. Advantages of the incoherent uniform theory of diffraction for acoustic calculations in open-plan offices. *The Journal of the Acoustical Society of America* 2015;137:94–104. <https://doi.org/10.1121/1.4904527>.
- [65] Marbjerg G, Brunskog J, Jeong C-H. The difficulties of simulating the acoustics of an empty rectangular room with an absorbing ceiling. *Applied Acoustics* 2018;141:35–45. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2018.06.017>.
- [66] Jeong C-H, Ih J-G. Effects of source and receiver locations in predicting room transfer functions by a phased beam tracing method. *The Journal of the Acoustical Society of America* 2012;131:3864–75. <https://doi.org/10.1121/1.3699268>.
- [67] Lam YW. Issues for computer modelling of room acoustics in non-concert hall settings. *Acoust Sci & Tech* 2005;26:145–55. <https://doi.org/10.1250/ast.26.145>.
- [68] Hodgson M. Evidence of diffuse surface reflections in rooms. *The Journal of the Acoustical Society of America* 1991;89:765–71. <https://doi.org/10.1121/1.1894636>.
- [69] ISO 11654:1997 - Acoustics - Sound absorbers for use in buildings - Rating of sound absorption. The International Organization for Standardization (ISO) 1997.
- [70] JCGM 101:2008 - Evaluation of measurement data - Supplement 1 to the “Guide to the expression of uncertainty in measurement” - Propagation of distributions using a Monte-Carlo method. The Joint Committee for Guides in Metrology 2008.
- [71] VDI 2569:2019 - Schallschutz und akustische Gestaltung im Büro (Sound protection and acoustical design in offices). Verein Deutscher Ingenieure (VDI) 2019.
- [72] Kelz P. Ringversuch zur raumakustischen Messung von Großraumbüros gemäß DIN EN ISO 3382-3 2018:3.
- [73] Harvie-Clark J, Larrieu F, Opsanger C. ISO 3382-3: Necessary But Not Sufficient. A New Approach To Acoustic Design for Activity-Based-Working Offices. *Proceedings of the 23rd International Congress on Acoustics, Aachen, Germany: 2019, p. 8.*
- [74] Zwicker E, Fastl H. *Psychoacoustics*. vol. 22. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; 1999. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-09562-1>.

- [75] Renz T, Leistner P, Liebl A. A simple model to predict the cognitive performance in distracting background speech. *Conference Proceedings* 2018:6.
- [76] Parizet E, Chevret P, Kostallari K. A simple sound metric for evaluating sound annoyance in open-plan offices. *The Journal of the Acoustical Society of America* 2017;141:3966–3966. <https://doi.org/10.1121/1.4989029>.
- [77] Vellenga S, Bouwhuis T, Höngens T. Proposed method for measuring “liveliness” in open-plan offices. 2017:9.
- [78] NF S31-199 : Acoustique - Performances acoustiques des espaces ouverts de bureaux (Acoustics - Acoustic performances of open-plan offices). Agence Française de Normalisation (AFNOR) 2016.
- [79] Kostallari K. Contribution à l'étude des effets psychologiques du bruit de parole dans les bureaux ouverts. Thèse de doctorat. Université de Lyon, 2019.
- [80] Absol Vidéos, Le Monde à l'Envers en 12 questions, Youtube, 2018, <https://www.youtube.com/watch?v=MkCNgzhTU1c>.
- [81] Absol Vidéos, Toopet en 12 questions, Youtube, 2019, <https://www.youtube.com/watch?v=ux0C87L4wgA>.
- [82] Absol Vidéos, Didi Chandouidoui en 12 questions, Youtube, 2017, <https://www.youtube.com/watch?v=t6dqFEgjBCY>.
- [83] Mcfly et Carlito, Les voyages qui ont marqué nos vies feat Cyrus North et Patrick Baud (Axolot), Youtube, 2021, <https://www.youtube.com/watch?v=IN7sVJ7NwW0>.
- [84] Monson BB, Lotto AJ, Story BH. Analysis of high-frequency energy in long-term average spectra of singing, speech, and voiceless fricatives. *The Journal of the Acoustical Society of America* 2012;132:1754–64. <https://doi.org/10.1121/1.4742724>.
- [85] ISO 16283-1:2014 - Acoustique — Mesurage in situ de l'isolation acoustique des bâtiments et des éléments de construction — Partie 1 : Isolation des bruits aériens. The International Organization for Standardization (ISO) 2014.
- [86] Galy E. Consideration of several mental workload categories: perspectives for elaboration of new ergonomic recommendations concerning shiftwork. *Theoretical Issues in Ergonomics Science* 2017;19:483–97. <https://doi.org/10.1080/1463922X.2017.1381777>.
- [87] Galy E. Approche intégrative de la charge mentale de travail : une échelle d'évaluation basée sur le modèle ICA (Individu – Charge – Activité), 2016, p. 1–9.
- [88] Mueller BJ, Dickschen A, Martin N. How reliable are ISO 3382-3:2012 measurements to predict employee satisfaction with acoustics in open space offices? Preliminary results of multiple measurements as well as in-situ surveys 2020:5 pages. <https://doi.org/10.48465/FA.2020.0215>.

- [89] ISO 9612:2009 - Acoustique - Détermination de l'exposition au bruit en milieu de travail - Méthode d'expertise. The International Organization for Standardization (ISO) 2009.
- [90] Pearsons KS, Bennett RL, Fidell S. Speech levels in various noise environments. Washington DC: U.S. Environmental Protection Agency; 1977.

Annexe A. Développements des expressions analytiques des incertitudes de mesure

Dans l'ensemble des équations ci-dessous, les sommes, variances et covariances sont évaluées sur les positions de mesure.

A.1. Incertitude de mesure de D_{2S}

$$D_{2S} = -\frac{N \cdot \sum L_{pAS} \cdot \log_2(r) - \sum L_{pAS} \cdot \sum \log_2(r)}{N \cdot \sum \log_2(r)^2 - (\sum \log_2(r))^2}$$

$$u_{D_{2S}}^2 = \sum \left(\frac{\partial D_{2S}}{\partial L_{pASi}} \cdot u_{L_{pASi}} \right)^2 + \sum \left(\frac{\partial D_{2S}}{\partial r_i} \cdot u_r \right)^2 = u_{D_{2S}}^2(L) + u_{D_{2S}}^2(r)$$

A.1.1. Évaluation de $u_{D_{2S}}^2(L)$

$$\frac{\partial D_{2S}}{\partial L_{pASi}} = -\frac{N \cdot \log_2(r_i) - \sum \log_2(r)}{N \cdot \sum \log_2(r)^2 - (\sum \log_2(r))^2} = -\frac{\log_2(r_i) - \overline{\log_2(r)}}{N \cdot \text{Var}(\log_2(r))}$$

$$u_{D_{2S}}^2(L) = \frac{\sum (\log_2(r_i) - \overline{\log_2(r)})^2 u_{L_{pASi}}^2}{N^2 \cdot \text{Var}(\log_2(r))^2} = \frac{\text{Cov}(\log_2(r), (\log_2(r) - \overline{\log_2(r)}) \cdot u_{L_{pAS}}^2)}{N \cdot \text{Var}(\log_2(r))^2}$$

A.1.2. Évaluation de $u_{D_{2S}}^2(r)$

$$\frac{\partial D_{2S}}{\partial r_i} = \frac{\partial \log_2(r_i)}{\partial r_i} \cdot \frac{\partial D_{2S}}{\partial \log_2(r_i)} = \frac{-1}{\log(2) \cdot r_i} \cdot (T_1 - T_2)$$

$$T_1 = \frac{(N \cdot L_{pASi} - \sum L_{pAS})(N \cdot \sum \log_2(r)^2 - (\sum \log_2(r))^2)}{(N \cdot \sum \log_2(r)^2 - (\sum \log_2(r))^2)^2} = \frac{(N \cdot L_{pASi} - \sum L_{pAS})}{N^2 \cdot \text{Var}(\log_2(r))}$$

$$T_2 = \frac{2(N \cdot \log_2(r_i) - \sum \log_2(r))(N \cdot \sum L_{pAS} \log_2(r) - \sum L_{pAS} \cdot \sum \log_2(r))}{(N \cdot \sum \log_2(r)^2 - (\sum \log_2(r))^2)^2}$$

$$T_2 = \frac{-2 \cdot D_{2S} \cdot (N \cdot \log_2(r_i) - \sum \log_2(r))}{N^2 \cdot \text{Var}(\log_2(r))}$$

$$\frac{\partial D_{2S}}{\partial r_i} = \frac{-1}{\log(2) \cdot r_i} \cdot \frac{(N \cdot L_{pASi} - \sum L_{pAS}) + 2 \cdot D_{2S} \cdot (N \cdot \log_2(r_i) - \sum \log_2(r))}{N^2 \cdot \text{Var}(\log_2(r))}$$

$$\frac{\partial D_{2S}}{\partial r_i} = \frac{-1}{\log(2) \cdot r_i} \cdot \frac{N \cdot \alpha_i - \sum \alpha}{N^2 \cdot \text{Var}(\log_2(r))} = \frac{-1}{\log(2) \cdot r_i} \cdot \frac{\alpha_i - \bar{\alpha}}{N \cdot \text{Var}(\log_2(r))}$$

$$u_{D_{2S}}^2(r) = \frac{u_r^2}{\log(2)^2 \cdot N^2 \cdot \text{Var}(\log_2(r))^2} \cdot \sum \frac{(\alpha_i - \bar{\alpha})^2}{r_i^2} = \frac{u_r^2 \cdot \text{Cov}(\alpha, \alpha - \bar{\alpha}/r^2)}{\log(2)^2 \cdot N \cdot \text{Var}(\log_2(r))^2}$$

$$u_{D_{2S}}^2 = \frac{\text{Cov}(\log_2(r), (\log_2(r) - \overline{\log_2(r)}) \cdot u_{L_{pAS}}^2) + \frac{u_r^2}{\log(2)^2} \cdot \text{Cov}(\alpha, \alpha - \bar{\alpha}/r^2)}{N \cdot \text{Var}(\log_2(r))^2}$$

A.2. Incertitude de mesure de L_{pAS4m}

$$L_{pAS4m} = \frac{1}{N} \sum L_{pAS} + D_{2S} \cdot \frac{1}{N} \cdot \sum \log_2 \left(\frac{r}{4} \right)$$

$$u_{L_{pAS4m}}^2 = \sum \left(\frac{\partial L_{pAS4m}}{\partial L_{pASi}} \cdot u_{L_{pASi}} \right)^2 + \sum \left(\frac{\partial L_{pAS4m}}{\partial r_i} \cdot u_r \right)^2 = u_{L_{pAS4m}}^2(L) + u_{L_{pAS4m}}^2(r)$$

A.2.1. Évaluation de $u_{L_{pAS4m}}^2(L)$

$$\frac{\partial L_{pAS4m}}{\partial L_{pASi}} = \frac{1}{N} + \frac{\partial D_{2S}}{\partial L_{pASi}} \cdot \overline{\log_2 \left(\frac{r}{4} \right)}$$

$$u_{L_{pAS4m}}^2(L) = \frac{1}{N^2} \sum u_{L_{pAS}}^2 + \overline{\log_2 \left(\frac{r}{4} \right)^2} \cdot \sum \left(\frac{\partial D_{2S}}{\partial L_{pASi}} \cdot u_{L_{pASi}} \right)^2 + \frac{2}{N} \cdot \overline{\log_2 \left(\frac{r}{4} \right)} \cdot T_3$$

$$T_3 = \sum \frac{\partial D_{2S}}{\partial L_{pASi}} \cdot u_{L_{pASi}}^2 = \frac{-1}{N \cdot \text{Var}(\log_2(r))} \sum (\log_2(r_i) - \overline{\log_2(r)}) \cdot u_{L_{pASi}}^2$$

$$T_3 = - \frac{\text{Cov}(\log_2(r), u_{L_{pAS}}^2)}{\text{Var}(\log_2(r))}$$

$$u_{L_{pAS4m}}^2(L) = \frac{\overline{u_{L_{pAS}}^2}}{N} + \overline{\log_2 \left(\frac{r}{4} \right)^2} \cdot u_{D_{2S}}^2(L) - \frac{2}{N} \cdot \overline{\log_2 \left(\frac{r}{4} \right)} \cdot \frac{\text{Cov}(\log_2(r), u_{L_{pAS}}^2)}{\text{Var}(\log_2(r))}$$

A.2.2. Évaluation de $u_{L_{pAS4m}}^2(r)$

$$\frac{\partial L_{pAS4m}}{\partial r_i} = \frac{D_{2S}}{N} \cdot \frac{1}{\log(2) \cdot r_i} + \frac{\partial D_{2S}}{\partial r_i} \cdot \overline{\log_2 \left(\frac{r}{4} \right)}$$

$$u_{L_{pAS4m}}^2(r) = \left(\frac{D_{2S} \cdot u_r}{N \cdot \log(2)} \right)^2 \cdot \sum \frac{1}{r_i^2} + \overline{\log_2 \left(\frac{r}{4} \right)^2} \cdot \sum \left(\frac{\partial D_{2S}}{\partial r_i} \cdot u_r \right)^2 + \frac{2 \cdot D_{2S} \cdot u_r^2}{N \cdot \log(2)} \cdot \overline{\log_2 \left(\frac{r}{4} \right)} \cdot T$$

$$T_4 = \sum \frac{\partial D_{2S}}{\partial r_i} \cdot \frac{1}{r_i} = \frac{-1}{\log(2) \cdot N \cdot \text{Var}(\log_2(r))} \cdot \sum \frac{\alpha_i - \bar{\alpha}}{r_i^2}$$

$$T_4 = \frac{-1}{\log(2)} \cdot \frac{\text{Cov}(\alpha, 1/r^2)}{\text{Var}(\log_2(r))}$$

$$u_{L_{pAS4m}}^2(r) = \frac{D_{2S}^2 \cdot u_r^2}{N \cdot \log(2)^2} \cdot \overline{\left(\frac{1}{r^2} \right)} + \overline{\log_2 \left(\frac{r}{4} \right)^2} \cdot u_{D_{2S}}^2(r) - \frac{2 \cdot D_{2S} \cdot u_r^2}{N \cdot \log(2)^2} \cdot \overline{\log_2 \left(\frac{r}{4} \right)} \cdot \frac{\text{Cov}(\alpha, 1/r^2)}{\text{Var}(\log_2(r))}$$

$$u_{L_{pAS4m}}^2 = \frac{\overline{u_{L_{pAS}}^2}}{N} + \frac{D_{2S}^2 \cdot u_r^2}{N \cdot \log(2)^2} \cdot \overline{\left(\frac{1}{r^2} \right)} + \overline{\log_2 \left(\frac{r}{4} \right)^2} \cdot u_{D_{2S}}^2 - \frac{2}{N} \cdot \overline{\log_2 \left(\frac{r}{4} \right)} \cdot \frac{\text{Cov}(\log_2(r), u_{L_{pAS}}^2)}{\text{Var}(\log_2(r))} - \frac{2 \cdot D_{2S} \cdot u_r^2}{N \cdot \log(2)^2} \cdot \overline{\log_2 \left(\frac{r}{4} \right)} \cdot \frac{\text{Cov}(\alpha, 1/r^2)}{\text{Var}(\log_2(r))}$$

A.3. Incertitudes de mesure de r_c

$$r_c = 4 \cdot 2^{\frac{L_{pAS4m}-45}{D_{2S}}} = 4 \cdot \exp\left(\log(2) \cdot \frac{L_{pAS4m} - 45}{D_{2S}}\right)$$

$$u_{r_c}^2 = \sum \left(\frac{\partial r_c}{\partial L_{pASi}} \cdot u_{L_{pASi}} \right)^2 + \sum \left(\frac{\partial r_c}{\partial r_i} \cdot u_r \right)^2 = u_{r_c}^2(L) + u_{r_c}^2(r)$$

A.3.1. Évaluation de $u_{r_c}^2(L)$

$$\frac{\partial r_c}{\partial L_{pASi}} = \frac{\log(2) \cdot r_c}{D_{2S}} \cdot \frac{\partial L_{pAS4m}}{\partial L_{pASi}} - \frac{\log(2) \cdot r_c}{D_{2S}} \cdot \log_2\left(\frac{r_c}{4}\right) \cdot \frac{\partial D_{2S}}{\partial L_{pASi}}$$

$$\frac{\partial r_c}{\partial L_{pASi}} = \frac{\log(2) \cdot r_c}{D_{2S}} \cdot \left(\frac{\partial L_{pAS4m}}{\partial L_{pASi}} - \log_2\left(\frac{r_c}{4}\right) \cdot \frac{\partial D_{2S}}{\partial L_{pASi}} \right)$$

$$u_{r_c}^2(L) = \left(\frac{\log(2) \cdot r_c}{D_{2S}} \right)^2 \cdot \left[u_{L_{pAS4m}}^2(L) + \log_2\left(\frac{r_c}{4}\right)^2 \cdot u_{D_{2S}}^2(L) - 2 \cdot \log_2\left(\frac{r_c}{4}\right) \cdot T_5 \right]$$

$$T_5 = \sum \frac{\partial L_{pAS4m}}{\partial L_{pASi}} \cdot \frac{\partial D_{2S}}{\partial L_{pASi}} \cdot u_{L_{pASi}}^2 = \sum \left(\frac{1}{N} + \frac{\partial D_{2S}}{\partial L_{pASi}} \cdot \overline{\log_2\left(\frac{r}{4}\right)} \right) \cdot \frac{\partial D_{2S}}{\partial L_{pASi}} \cdot u_{L_{pASi}}^2$$

$$T_5 = \frac{T_3}{N} + \log_2\left(\frac{r}{4}\right) \cdot u_{D_{2S}}^2(L)$$

$$u_{r_c}^2(L) = \left(\frac{\log(2) \cdot r_c}{D_{2S}} \right)^2 \cdot \left[u_{L_{pAS4m}}^2(L) + \left(\log_2\left(\frac{r_c}{4}\right)^2 - 2 \cdot \log_2\left(\frac{r_c}{4}\right) \cdot \overline{\log_2\left(\frac{r}{4}\right)} \right) \cdot u_{D_{2S}}^2(L) \right] \\ + \left(\frac{\log(2) \cdot r_c}{D_{2S}} \right)^2 \cdot \frac{2}{N} \cdot \log_2\left(\frac{r_c}{4}\right) \cdot \frac{\text{Cov}(\log_2(r), u_{L_{pAS}}^2)}{\text{Var}(\log_2(r))}$$

A.3.2. Évaluation de $u_{r_c}^2(r)$

$$\frac{\partial r_c}{\partial r_i} = \frac{\log(2) \cdot r_c}{D_{2S}} \cdot \left(\frac{\partial L_{pAS4m}}{\partial r_i} - \log_2\left(\frac{r_c}{4}\right) \cdot \frac{\partial D_{2S}}{\partial r_i} \right)$$

$$u_{r_c}^2(r) = \left(\frac{\log(2) \cdot r_c}{D_{2S}} \right)^2 \cdot \left[u_{L_{pAS4m}}^2(r) + \log_2\left(\frac{r_c}{4}\right)^2 \cdot u_{D_{2S}}^2(r) - 2 \cdot \log_2\left(\frac{r_c}{4}\right) \cdot T_6 \right]$$

$$T_6 = \sum \frac{\partial L_{pAS4m}}{\partial r_i} \cdot \frac{\partial D_{2S}}{\partial r_i} \cdot u_r^2 = \sum \left(\frac{D_{2S}}{N \cdot \log(2) \cdot r_i} + \frac{\partial D_{2S}}{\partial r_i} \cdot \overline{\log_2\left(\frac{r}{4}\right)} \right) \cdot \frac{\partial D_{2S}}{\partial r_i} \cdot u_r^2$$

$$T_6 = \frac{D_{2S} \cdot u_r^2 \cdot T_4}{N \cdot \log(2)} + \log_2\left(\frac{r}{4}\right) \cdot u_{D_{2S}}^2(r)$$

$$u_{r_c}^2(r) = \left(\frac{\log(2) \cdot r_c}{D_{2S}} \right)^2 \cdot \left[u_{L_{pAS4m}}^2(r) + \left(\log_2\left(\frac{r_c}{4}\right)^2 - 2 \cdot \log_2\left(\frac{r_c}{4}\right) \cdot \overline{\log_2\left(\frac{r}{4}\right)} \right) \cdot u_{D_{2S}}^2(r) \right] \\ + \left(\frac{\log(2) \cdot r_c}{D_{2S}} \right)^2 \cdot \frac{D_{2S} \cdot u_r^2}{N \cdot \log(2)^2} \cdot \log_2\left(\frac{r_c}{4}\right) \cdot \frac{\text{Cov}(\alpha, 1/r^2)}{\text{Var}(\log_2(r))}$$

$$u_{r_c}^2 = \left(\frac{\log(2) \cdot r_c}{D_{2S}} \right)^2 \cdot \left[u_{L_{pAS4m}}^2 + \left(\log_2 \left(\frac{r_c}{4} \right)^2 - 2 \cdot \log_2 \left(\frac{r_c}{4} \right) \cdot \overline{\log_2 \left(\frac{r}{4} \right)} \right) \cdot u_{D_{2S}}^2 + \frac{2 \cdot \text{Cov}(\log_2(r), u_{L_{pAS}}^2) + \frac{D_{2S} \cdot u_r^2}{\log(2)^2} \cdot \text{Cov}(\alpha, 1/r^2)}{N \cdot \text{Var}(\log_2(r))} \cdot \log_2 \left(\frac{r_c}{4} \right) \right]$$

A.4. Incertitudes de mesure du STI

$$m_{i,f} = m_{1,i} \cdot m_{2,i,f} = \frac{1}{1 + 10^{-\frac{\text{SNR}_i}{10}}} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{2\pi F_f \text{Tr}_i}{13,8} \right)^2}}$$

$$\text{SNR}_{\text{eff},i,f} = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{m_{i,f}}{1 - m_{i,f}} \right) \in [-15; +15]$$

$$\text{TI}_{i,f} = \frac{\text{SNR}_{\text{eff},i,f} + 15}{30}$$

$$\text{MTI}_i = \frac{1}{14} \cdot \sum_{f=1}^{14} \text{TI}_{i,f}$$

$$\text{STI} = \sum_{i=1}^7 \alpha_i \cdot \text{MTI}_i - \sum_{i=1}^6 \beta_i \cdot \sqrt{\text{MTI}_i \cdot \text{MTI}_{i+1}}$$

$$u_{\text{STI}}^2 = \sum \left(\frac{\partial \text{STI}}{\partial \text{SNR}_i} \cdot u_{\text{SNR}_i} \right)^2 + \sum \left(\frac{\partial \text{STI}}{\partial \text{Tr}_i} \cdot u_{\text{Tr}_i} \right)^2 = u_{\text{STI}}^2(\text{SNR}) + u_{\text{STI}}^2(\text{Tr})$$

A.4.1. Évaluation de $u_{\text{STI}}^2(\text{SNR})$

$$\frac{\partial \text{STI}}{\partial \text{SNR}_i} = \frac{\partial \text{STI}}{\partial \text{MTI}_i} \cdot \frac{1}{14} \sum_{f=1}^{14} \frac{\partial \text{TI}_{i,f}}{\partial \text{SNR}_{\text{eff},i,f}} \cdot \frac{\partial \text{SNR}_{\text{eff},i,f}}{\partial m_{i,f}} \cdot \frac{\partial m_{i,f}}{\partial \text{SNR}_i}$$

$$\frac{\partial \text{STI}}{\partial \text{MTI}_i} = \alpha_i - \frac{\beta_i \sqrt{\text{MTI}_{i+1}} + \beta_{i+1} \sqrt{\text{MTI}_{i-1}}}{\sqrt{\text{MTI}_i}}$$

$$\frac{\partial \text{TI}_{i,f}}{\partial \text{SNR}_{\text{eff},i,f}} = \frac{1}{30}$$

$$\frac{\partial \text{SNR}_{\text{eff},i,f}}{\partial m_{i,f}} = \frac{10}{\log(10)} \cdot \frac{G_{i,f}}{m_{i,f} \cdot (1 - m_{i,f})}$$

$$\frac{\partial m_{i,f}}{\partial \text{SNR}_i} = -\frac{\log(10)}{10} \cdot m_{i,f} \cdot (1 - m_{1,i})$$

$$u_{STI}^2(\text{SNR}) = \frac{1}{420^2} \sum_{i=1}^7 \left(\alpha_i - \frac{\beta_i \sqrt{MTI_{i+1}} + \beta_{i-1} \sqrt{MTI_{i-1}}}{2\sqrt{MTI_i}} \right)^2 (1 - m_{1i})^2 \left(\sum_{f=1}^{14} \left(\frac{G_{if}}{1 - m_{if}} \right) \cdot u_{\text{SNR}_i} \right)^2$$

Le SNR est évalué à partir du niveau de parole et du niveau du bruit de fond, qui correspond à la moyenne des mesures réalisées sur les positions de mesure, on a donc :

$$u_{\text{SNR}_i} = \left(1 + \frac{1}{\sqrt{2N}} \right) \cdot u_{\text{oct}}$$

A.4.2. Évaluation de $u_{STI}^2(\text{Tr})$

$$\frac{\partial STI}{\partial \text{Tr}_i} = \frac{\partial STI}{\partial MTI_i} \cdot \frac{1}{14} \sum_{f=1}^{14} \frac{\partial T_{I_{if}}}{\partial \text{SNR}_{\text{eff},i,f}} \frac{\partial \text{SNR}_{\text{eff},i,f}}{\partial m_{i,f}} \frac{\partial m_{i,f}}{\partial \text{Tr}_i}$$

$$\frac{\partial m_{i,f}}{\partial \text{Tr}_i} = - \left(\frac{2\pi F_f}{13,8} \right)^2 \cdot \text{Tr}_i \cdot m_{i,f} \cdot m_{2,i,f}^2$$

$$u_{STI}^2(\text{SNR}) = \frac{1}{420^2} \sum_{i=1}^7 \left(\alpha_i - \frac{\beta_i \sqrt{MTI_{i+1}} + \beta_{i-1} \sqrt{MTI_{i-1}}}{2\sqrt{MTI_i}} \right)^2 \left(\frac{10}{\log(10)} \right)^2 \left(\frac{2\pi}{13,8} \right)^4 \text{Tr}_i^2 \left(\sum_{f=1}^{14} \left(\frac{G_{if} m_{2if}^2 F_f^2}{1 - m_{if}} \right) \cdot u_{\text{Tr}_i} \right)^2$$

$$u_{STI}^2 = \frac{1}{420^2} \sum_{i=1}^7 \left(\alpha_i - \frac{\beta_i \sqrt{MTI_{i+1}} + \beta_{i-1} \sqrt{MTI_{i-1}}}{2\sqrt{MTI_i}} \right)^2 \cdot \left[\begin{array}{l} (1 - m_{1i})^2 \cdot \left(\sum_{f=1}^{14} \left(\frac{G_{if}}{1 - m_{if}} \right) \cdot \left(1 + \frac{1}{\sqrt{2N}} \right) \cdot u_{\text{oct},i} \right)^2 \\ + \left(\frac{10}{\log(10)} \right)^2 \left(\frac{2\pi}{13,8} \right)^4 \text{Tr}_i^2 \left(\sum_{f=1}^{14} \left(\frac{G_{if} m_{2if}^2 F_f^2}{1 - m_{if}} \right) \cdot u_{\text{Tr}_i} \right)^2 \end{array} \right]$$

A.5. Incertitudes de mesure de r_D

$$r_D = \frac{0,5 - b}{a} \text{ ou } \begin{cases} a = \frac{N \cdot \sum_{n=1}^N STI_n \cdot r_n - \sum_{n=1}^N STI_n \cdot \sum_{n=1}^N r_n}{N \cdot \sum_{n=1}^N r_n^2 - (\sum_{n=1}^N r_n)^2} \\ b = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N STI_n - a \cdot \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N r_n \end{cases}$$

$$u_{r_D}^2 = \sum \left(\frac{\partial r_D}{\partial STI_n} \cdot u_{STI_n} \right)^2 + \sum \left(\frac{\partial r_D}{\partial r_n} \cdot u_r \right)^2 = u_{r_D}^2(\text{STI}) + u_{r_D}^2(r)$$

A.5.1. Évaluation de $u_{r_D}^2(\text{STI})$

$$\frac{\partial r_D}{\partial STI_n} = \frac{\partial r_D}{\partial b} \cdot \frac{\partial b}{\partial STI_n} + \frac{\partial r_D}{\partial a} \cdot \frac{\partial a}{\partial STI_n} = \frac{-1}{a} \left(\frac{1}{N} - \bar{r} \cdot \frac{\partial a}{\partial STI_n} \right) - \frac{r_D}{a} \cdot \frac{\partial a}{\partial STI_n}$$

$$\frac{\partial r_D}{\partial STI_n} = - \left(\frac{1}{Na} + \frac{r_D - \bar{r}}{a} \frac{\partial a}{\partial STI_n} \right)$$

$$u_{r_D}^2(\text{STI}) = \frac{\overline{u_{STI}^2}}{a^2 N} + 2 \frac{r_D - \bar{r}}{a^2 N} \cdot T_1 + \left(\frac{r_D - \bar{r}}{a} \right)^2 \cdot T_2$$

$$T_1 = \sum \frac{\partial a}{\partial STI_n} u_{STI_n}^2 = \sum \frac{r_n - \bar{r}}{N \cdot \text{Var}(r)} u_{STI_n}^2 = \frac{\text{Cov}(r, u_{STI}^2)}{\text{Var}(r)}$$

$$T_2 = \sum \left(\frac{\partial a}{\partial STI_n} u_{STI_n} \right)^2 = \frac{1}{N^2 \cdot \text{Var}(r)^2} \sum (r_n - \bar{r})^2 u_{STI_n}^2 = \frac{\text{Cov}(r, (r - \bar{r}) \cdot u_{STI_n}^2)}{N \cdot \text{Var}(r)^2}$$

$$u_{r_D}^2(\text{STI}) = \frac{\overline{u_{STI}^2}}{a^2 N} + 2 \frac{r_D - \bar{r}}{a^2 N} \frac{\text{Cov}(r, u_{STI}^2)}{\text{Var}(r)} + \left(\frac{r_D - \bar{r}}{a} \right)^2 \frac{\text{Cov}(r, (r - \bar{r}) \cdot u_{STI_n}^2)}{N \cdot \text{Var}(r)^2}$$

A.5.2. Évaluation de $u_{r_D}^2(r)$

$$\frac{\partial r_D}{\partial r_n} = \frac{\partial r_D}{\partial b} \cdot \frac{\partial b}{\partial r_n} + \frac{\partial r_D}{\partial a} \cdot \frac{\partial a}{\partial r_n} = \frac{-1}{a} \left(-\frac{a}{N} - \bar{r} \cdot \frac{\partial a}{\partial r_n} \right) - \frac{r_D}{a} \cdot \frac{\partial a}{\partial r_n} = \frac{1}{N} - \frac{(r_D - \bar{r})}{a} \cdot \frac{\partial a}{\partial r_n}$$

$$u_{r_D}^2(r) = u_r^2 \cdot \sum \left(\frac{1}{N} - \frac{(r_D - \bar{r})}{a} \cdot \frac{\partial a}{\partial r_n} \right)^2$$

$$u_{r_D}^2 = \frac{u_r^2}{N} - 2 \cdot u_r^2 \cdot \frac{(r_D - \bar{r})}{a} \cdot T_3 + u_r^2 \cdot \left(\frac{(r_D - \bar{r})}{a} \right)^2 \cdot T_4$$

$$T_3 = \sum \frac{\partial a}{\partial r_n} = \sum \frac{STI_n - \overline{STI} - 2a(r_n - \bar{r})}{N \cdot \text{Var}(r)} = 0$$

$$T_4 = \sum \left(\frac{\partial a}{\partial r_n} \right)^2 = \frac{1}{N^2 \cdot \text{Var}(r)^2} \sum (STI_n - \overline{STI} - 2a(r_n - \bar{r}))^2$$

$$T_4 = \frac{1}{N^2 \cdot \text{Var}(r)^2} \left[\sum (STI - \overline{STI})^2 + 4a^2 \sum (r_n - \bar{r})^2 - 4a \sum (STI - \overline{STI})(r_n - \bar{r}) \right]$$

$$T_4 = \frac{1}{N \cdot \text{Var}(r)^2} [\text{Var}(STI) + 4a^2 \text{Var}(r) - 4a \text{Cov}(r, STI)]$$

$$T_4 = \frac{\text{Var}(STI)}{N \cdot \text{Var}(r)^2} \text{ car } \text{Cov}(r, STI) = a \cdot \text{Var}(r)$$

$$u_{r_D}^2(r) = \frac{u_r^2}{N} + u_r^2 \cdot \left(\frac{(r_D - \bar{r})}{a} \right)^2 \frac{\text{Var}(STI)}{N \cdot \text{Var}(r)^2}$$

$$u_{r_D}^2 = \frac{\overline{u_{STI}^2}}{a^2 N} + \frac{u_r^2}{N} + 2 \frac{r_D - \bar{r}}{a^2 N} \frac{\text{Cov}(r, u_{STI}^2)}{\text{Var}(r)} + \left(\frac{r_D - \bar{r}}{a} \right)^2 \frac{\text{Cov}(r, (r - \bar{r}) \cdot u_{STI_n}^2)}{N \cdot \text{Var}(r)} + u_r^2 \cdot \frac{\text{Var}(STI)}{N \cdot \text{Var}(r)^2}$$

Annexe B. Simplification des expressions analytiques des incertitudes de mesure

Cette annexe a été rédigée par Alkahf Aboutiman, étudiant de Master 2 Acoustique à la Sorbonne Université, qui a réalisé ce travail durant son stage de fin d'étude en 2022.

Les équations des incertitudes des indicateurs de qualité acoustique dans les bureaux ouverts présentées dans le document sont précises mais sont trop complexes pour être utilisées dans une norme. Il est nécessaire de les simplifier afin qu'elles puissent être exploitées par les utilisateurs de la norme. Pour ce faire, un étudiant stagiaire a été recruté dans le cadre de la thèse pour réaliser ce travail. Ci-après est présentée la méthode mise en place pour simplifier les expressions analytiques des incertitudes des indicateurs de qualité acoustique des bureaux ouverts.

Ces simplifications ont été faites sur la base de 41 mesures réalisées dans des bureaux en entreprises. Ces mesures donnent des valeurs de D_{2s} qui varient de 2,1 à 7,4 dB, des valeurs de L_{pAS4m} allant de 43,6 à 54,8 dB, des valeurs de r_c qui varient de 3,4 à 19,8 mètres et des valeurs de r_D entre 1 et 30 mètres. Les histogrammes de la Figure B-1 nous montrent la répartition obtenues pour les valeurs des indicateurs.

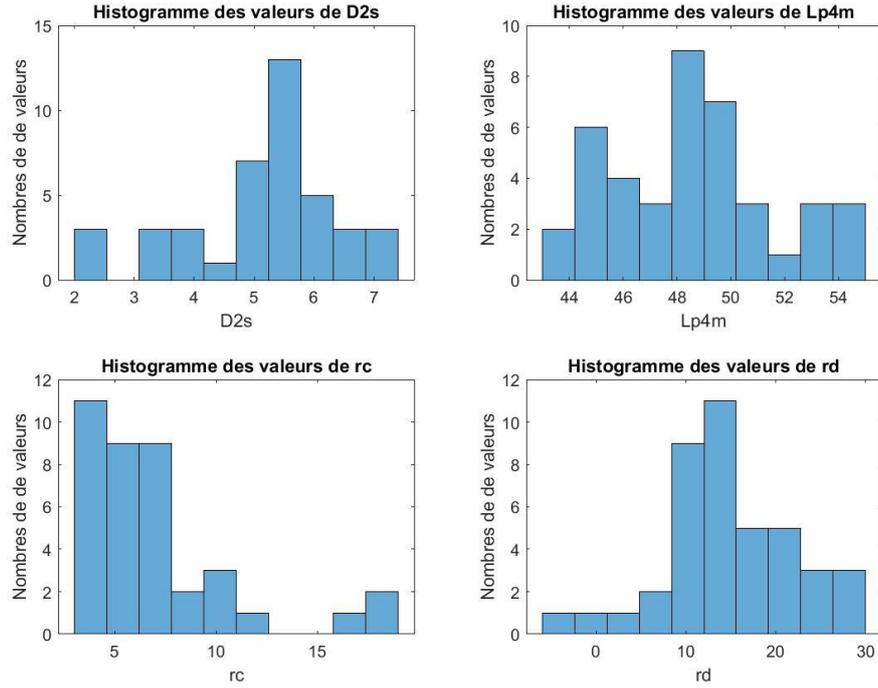


Figure B-1 : Histogrammes des valeurs de D_{2s} , L_{pAS4m} , r_c et r_D obtenues sur la base de 41 mesures réalisées en entreprises.

Les équations des incertitudes à simplifier sont les suivantes :

$$u_{D_{2s}}^2 = \frac{\text{Cov}(\log_2(r), (\log_2(r) - \overline{\log_2(r)}) \times u_{L_{pAS}}^2 + \frac{u_r^2}{\log(2)^2} \times \text{Cov}(\alpha, \frac{\alpha - \bar{\alpha}}{r^2})}{N \times \text{Var}(\log_2(r))^2} \quad (1)$$

$$u_{L_{pAS4m}}^2 = \frac{\overline{u_{L_{pAS}}^2}}{N} + \frac{D_{2s}^2 \cdot u_r^2}{N \cdot \log(2)^2} \times \left(\frac{1}{r^2} \right) + \overline{\log_2\left(\frac{r}{4}\right)^2} \cdot u_{D_{2s}}^2 - \frac{2}{N} \cdot \overline{\log_2\left(\frac{r}{4}\right)} \cdot \frac{\text{Cov}(\log_2(r), u_{L_{pAS}}^2)}{\text{Var}(\log_2(r))} - \frac{2 \cdot D_{2s} \cdot u_r^2}{N \cdot \log(2)^2} \cdot \overline{\log_2\left(\frac{r}{4}\right)} \cdot \frac{\text{Cov}\left(\alpha, \frac{1}{r^2}\right)}{\text{Var}(\log_2(r))} \quad (2)$$

$$u_{r_c}^2 = \left(\frac{\log(2) \cdot r_c}{D_{2s}} \right)^2 \cdot \left[\begin{aligned} & u_{L_{pAS4m}}^2 + \left(\log_2\left(\frac{r_c}{4}\right)^2 - 2 \cdot \log_2\left(\frac{r_c}{4}\right) \cdot \overline{\log_2\left(\frac{r}{4}\right)} \right) \cdot u_{D_{2s}}^2 \\ & + \frac{2 \cdot \text{Cov}(\log_2(r), u_{L_{pAS}}^2) + \frac{D_{2s} \cdot u_r^2}{\log(2)^2} \cdot \text{Cov}\left(\alpha, \frac{1}{r^2}\right)}{N \cdot \text{Var}(\log_2(r))} \cdot \log_2\left(\frac{r_c}{4}\right) \end{aligned} \right] \quad (3)$$

$$u_{r_D}^2 = \frac{\overline{u_{STI}^2}}{Na^2} + \frac{u_r^2}{N} + 2 \frac{r_D - \bar{r}}{Na^2} \cdot \frac{\text{Cov}(r, u_{STI}^2)}{\text{Var}(r)} + \left(\frac{r_D - \bar{r}}{a} \right)^2 \frac{\text{Cov}(r, (r - \bar{r}) \cdot u_{STI}^2) + u_r^2 \cdot \text{Var}(STI)}{N \cdot \text{Var}(r)^2} \quad (4)$$

Avec r qui représente la distance à la source, u_r est l'incertitude sur les distances de mesures, $u_{L_{pAS}}$ est l'incertitude sur les niveaux de pression et α est tel que, $\alpha_i = L_{pASi} + 2 \cdot D_{2s} \cdot \log_2(r_i)$ avec L_{pASi} le niveau de pression pondéré A sur l'octave i

pour une source de parole normalisée. a est la pente de la régression linéaire de l'intelligibilité en fonction de la distance. La validité des équations a été vérifiée en calculant l'erreur (en %) entre l'équation approximée et celle initiale. Cette erreur a été calculée avec l'équation suivante :

$$\text{Erreur} = \frac{|u_{\text{SNQ}} - u_{\text{SNQ,approx}}|}{u_{\text{SNQ}}} \times 100. \quad (5)$$

B.1. Première approximation

Dans un premier temps, les simplifications des équations ont été faites en estimant la moyenne de chaque terme pour l'ensemble des lignes de mesure. Chaque équation a été séparée en différents termes dont on évalue l'importance par rapport à la valeur finale. L'équation de l'incertitude de la D_{2s} a été séparée en deux termes dont l'expression et la valeur moyenne sur les 41 mesures sont données dans le tableau ci-dessous :

	Expression	Valeur moyenne et écart-type [dB ²]
Terme 1	$\frac{\text{Cov}(\log_2(r), (\log_2(r) - \overline{\log_2(r)}) \times u_{\text{LPAS}}^2)}{N \times \text{Var}(\log_2(r))^2}$	$0,14 \pm 0,18$
Terme 2	$\frac{\frac{u_r^2}{\log(2)^2} \times \text{Cov}\left(\alpha, \frac{\alpha - \bar{\alpha}}{r^2}\right)}{N \times \text{Var}(\log_2(r))^2}$	$0.0055 \pm 0,0028$

On voit clairement que pour l'équation de la $u_{D_{2s}}$ le terme prépondérant est le terme 1. L'erreur moyenne obtenue en négligeant le terme 2 est de $2,65 \pm 1,8$ %. Ainsi, après la première approximation $u_{D_{2s}}$ s'écrit selon l'équation (6).

$$u_{D_{2s}}^2 \approx \frac{\text{Cov}(\log_2(r), (\log_2(r) - \overline{\log_2(r)}) \times u_{\text{LPAS}}^2)}{N \times \text{Var}(\log_2(r))^2} \quad (6)$$

Pour les incertitudes des niveaux à 4 mètres de la source on obtient le tableau suivant :

	Expression	Valeur moyenne et écart-type [dB ²]
Terme 1	$\frac{\overline{u_{LpAs}^2}}{N}$	0,096 ± 0,035
Terme 2	$\frac{D_{2s}^2 \cdot u_r^2}{N \cdot \log(2)^2} \times \overline{\left(\frac{1}{r^2}\right)}$	0,0017 ± 9,5.10 ⁻⁴
Terme 3	$\overline{\log_2\left(\frac{r}{4}\right)^2} \cdot u_{D2s}^2$	0,0551 ± 0,061
Terme 4	$\frac{2}{N} \cdot \overline{\log_2\left(\frac{r}{4}\right)} \cdot \frac{\text{Cov}(\log_2(r), u_{LpAs}^2)}{\text{Var}(\log_2(r))}$	-0,0088 ± 0,0086
Terme 5	$\frac{2 \cdot D_{2s} \cdot u_r^2}{N \cdot \log(2)^2} \cdot \overline{\log_2\left(\frac{r}{4}\right)} \cdot \frac{\text{Cov}\left(\alpha, \frac{1}{r^2}\right)}{\text{Var}(\log_2(r))}$	-0,003 ± 0,0023

Ici, on voit que les termes 2 et 5 sont petits par rapport aux termes 1 et 3. Le terme 4 est en moyenne du même ordre de grandeur que les termes 2 et 5 mais son écart-type nous montre qu'il existe des cas où il est non négligeable donc dans la première approximation seulement les termes 2 et 5 vont être négligés. En faisant cela nous obtenons une erreur moyenne de $2,03 \pm 1,5 \%$. Après cette approximation, l'équation de u_{LpAS4m} est la suivante :

$$u_{LpAS4m}^2 \approx \frac{\overline{u_{LpAs}^2}}{N} + \overline{\log_2\left(\frac{r}{4}\right)^2} \cdot u_{D2s}^2 - \frac{2}{N} \cdot \overline{\log_2\left(\frac{r}{4}\right)} \cdot \frac{\text{Cov}(\log_2(r), u_{LpAs}^2)}{\text{Var}(\log_2(r))} \quad (7)$$

Pour l'étude de l'incertitude de la distance de confort nous allons prendre en compte uniquement les termes entre crochets de l'équation (3), car ils sont tous multipliés par le même facteur. On obtient le tableau ci-dessous :

	Expression	Valeur moyenne et écart-type [dB ²]
Terme 1	u_{LpAS4m}^2	$0,17 \pm 0,7$
Terme 2	$\left(\log_2\left(\frac{r_c}{4}\right)^2 - 2 \cdot \log_2\left(\frac{r_c}{4}\right) \cdot \overline{\log_2\left(\frac{r}{4}\right)}\right) \cdot u_{D2s}^2$	$0,28 \pm 0,83$
Terme 3	$\frac{2 \cdot \text{Cov}(\log_2(r), u_{LpAS}^2)}{N \cdot \text{Var}(\log_2(r))} \cdot \log_2\left(\frac{r_c}{4}\right)$	$-0,0077 \pm 0,03$
Terme 4	$\frac{\frac{D_{2s} \cdot u_r^2}{\log(2)^2} \cdot \text{Cov}\left(\alpha, \frac{1}{r^2}\right)}{N \cdot \text{Var}(\log_2(r))} \cdot \log_2\left(\frac{r_c}{4}\right)$	$-7,9 \cdot 10^{-4} \pm 7,07 \cdot 10^{-4}$

Les termes prépondérants pour cette équation sont les termes 1 et 2, le terme 3 pourrait être négligeable mais comme précédemment son écart-type nous montre qu'il peut représenter une part non négligeable de la valeur obtenue avec l'équation dans certains cas. Le seul terme négligeable ici est le terme 4. En faisant cette approximation on a une erreur moyenne de $2,03 \pm 1,5 \%$. L'équation simplifiée est donc la suivante :

$$u_{r_c}^2 \approx \left(\frac{\log(2) \cdot r_c}{D_{2s}}\right)^2 \cdot \left[u_{LpAS4m}^2 + \left(\log_2\left(\frac{r_c}{4}\right)^2 - 2 \cdot \log_2\left(\frac{r_c}{4}\right) \cdot \overline{\log_2\left(\frac{r}{4}\right)}\right) \cdot u_{D2s}^2 + \frac{2 \cdot \text{Cov}(\log_2(r), u_{LpAS}^2)}{N \cdot \text{Var}(\log_2(r))} \cdot \log_2\left(\frac{r_c}{4}\right) \right] \quad (8)$$

Le tableau présentant les différents termes des incertitudes de la distance de distraction est ci-dessous :

	Expression	Valeur moyenne et écart-type [m ²]
Terme 1	$\frac{u_{STI}^2}{Na^2}$	$0,13 \pm 0,1$
Terme 2	$\frac{u_r^2}{N}$	$4,3 \cdot 10^{-4} \pm 1,2 \cdot 10^{-4}$
Terme 3	$2 \cdot \left(\frac{r_D - \bar{r}}{Na^2}\right) \cdot \frac{\text{Cov}(r, u_{STI}^2)}{\text{Var}(r)}$	$0,3 \pm 0,45$
Terme 4	$\left(\frac{r_D - \bar{r}}{a}\right)^2 \frac{\text{Cov}(r, (r - \bar{r}) \cdot u_{STI}^2)}{N \cdot \text{Var}(r)^2}$	$3,27 \pm 6,3$
Terme 5	$\left(\frac{r_D - \bar{r}}{a}\right)^2 \frac{u_r^2 \cdot \text{Var}(STI)}{N \cdot \text{Var}(r)^2}$	$0,0096 \pm 0,016$

Ici, les termes 2 et 5 sont en moyenne très petit par rapport aux autres termes, à noter que le terme 4 représente une grande portion de la valeur de l'incertitude. En négligeant les termes 2 et 5 on obtient une erreur de $0,24 \pm 0,21 \%$. L'équation que l'on obtient de l'incertitude de la distance de distraction après la première approximation est la suivante :

$$u_{rD}^2 \approx \frac{\overline{u_{STI}^2}}{Na^2} - 2 \cdot \frac{r_D - \bar{r}}{Na^2} \cdot \frac{\text{Cov}(r, u_{STI}^2)}{\text{Var}(r)} + \left(\frac{r_D - \bar{r}}{a} \right)^2 \frac{\text{Cov}(r, (r - \bar{r}) \cdot u_{STI}^2)}{N \cdot \text{Var}(r)^2} \quad (9)$$

Tous les termes qui ont été négligés dépendent de l'incertitude de positionnement. En effet, nous considérons que u_r est égale à 5 centimètres. Les distances étant toutes en mètre, cela donne à u_r un ordre de grandeur de 10^{-2} . De plus, dans chacune des équations, ce terme est au carré : cela peut rendre les termes en u_r très petits et la première approximation consiste à les rendre négligeables.

B.2. Deuxième approximation

La deuxième approximation consiste à considérer l'incertitude des niveaux, u_{LpAS} , comme une constante dans les équations des incertitudes de la D_{2s} , des niveaux à 4 mètres de la source et de la distance de confort et à considère les incertitudes de l'intelligibilité comme constante dans l'équation de l'incertitude de la distance de distraction.

Pour considérer l'incertitude des niveaux comme une constante il faut choisir une valeur qui engendrera le moins d'erreur possible sur le calcul d'incertitude. Pour cela l'erreur de cette approximation a été calculée pour différentes valeurs. La Figure B-2 montre comment varie l'erreur en fonction des différentes valeurs de la constante.

Variation de l'erreur de l'approximation en fonction de l'incertitude sur les niveaux

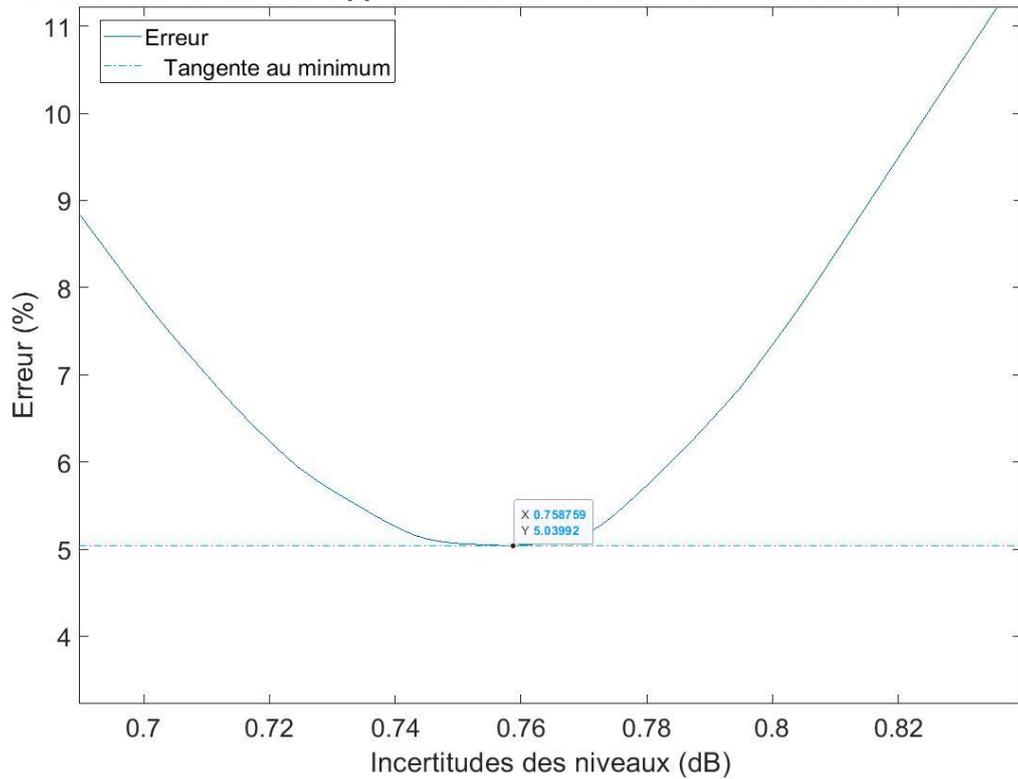


Figure B-2 : Courbes présentant la variation de l'erreur en fonction de la valeur de l'incertitude des niveaux.

Finalement, lorsque l'incertitude des niveaux est égale à 0,76, l'erreur est minimale, elle est égale à $5,05 \pm 4,03 \%$ pour $u_{D_{2S}}$, $5,6 \pm 4,04 \%$ pour u_{Lp4m} et $5 \pm 3,4 \%$ pour u_{rc} . Le fait de considérer l'incertitude des niveaux comme une constante va avoir pour conséquences que les termes avec $Cov(\log_2(r), u_{LpAS}^2)$ seront nulles et que le terme $Cov(\log_2(r), (\log_2(r) - \overline{\log_2(r)}) \cdot u_{LpAS}^2)$ va s'écrire $Var(r) \cdot u_{LpAS}^2$. Cette valeur d'incertitude des niveaux pondérés A de parole est légèrement supérieure à la valeur utilisée par la norme ISO 9612, qui formalise la mesure de l'exposition des salariés, qui, à partir de données empiriques sur des bruits industriels, estime l'incertitude de mesure d'un niveau pondéré A à 0,7 dB(A).

Les équations approximées des incertitudes de la D_{2S} , des niveaux à 4 mètres de la source et de la distance de confort s'écrivent finalement :

$$u_{D_{2S},a}^2 = \frac{0,76^2}{\sum(\log_2(r) - \overline{\log_2(r)})^2} \quad (10)$$

$$u_{LpAS4m,a}^2 = \frac{0,76^2}{N} + \overline{\left(\frac{r}{4}\right)^2} \cdot u_{D_{2S},a}^2 \quad (11)$$

$$u_{rc}^2 = \left(\frac{\log(2) \cdot r_c}{D_{2S}} \right)^2 \cdot \left[u_{LpAS4m,a}^2 + \left(\log_2 \left(\frac{r_c}{4} \right)^2 - 2 \cdot \log_2 \left(\frac{r_c}{4} \right) \cdot \overline{\log_2 \left(\frac{r}{4} \right)} \right) \cdot u_{D_{2S,a}}^2 \right] \quad (12)$$

La simplification de l'incertitude de la distance de distraction use du même processus sauf que cette fois c'est u_{STI} qui est considéré comme constante. Pour choisir la constante qui engendrera le moins d'erreur, nous avons calculé cette dernière pour différentes valeurs. La Figure B-3 nous montre comment l'erreur varie avec différentes valeurs de u_{STI} .

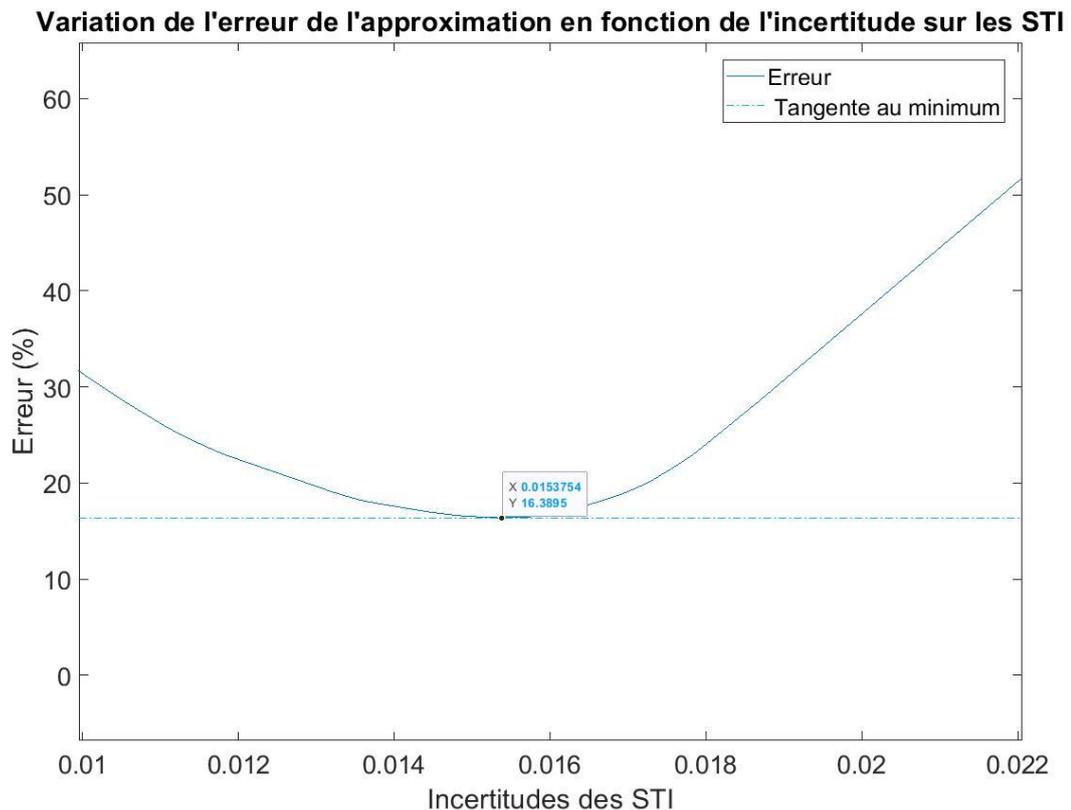


Figure B-3 : Courbe représentant la variation de l'erreur en fonction de la valeur de l'incertitude du STI

Quand l'incertitude de l'intelligibilité est égale à 0,015, l'erreur est minimale. Elle est de $16,39 \pm 15,6 \%$. Ici, quand u_{STI} est considérée comme une constante, $Cov(r, u_{STI}^2)$ est nulle et $Cov(r, (r - \bar{r}) \cdot u_{STI}^2)$ devient $Var(r) \cdot u_{STI}^2$ pour les mêmes raisons que précédemment. L'équation approximées de l'incertitudes de la distance de distraction est finalement la suivante :

$$u_{rD,a}^2 = \frac{0,015^2}{Na^2} + \left(\frac{r_D - \bar{r}}{a} \right)^2 \frac{0,015^2}{N \cdot Var(r)} \quad (13)$$

B.3. Validité des simplifications

Pour illustrer la validité des équations approximées nous avons représenté sur la figure B-4 les valeurs d'incertitudes calculées à partir des équations analytiques pour toutes les lignes de mesure en fonction de celles obtenues avec les équations approximées. Ces valeurs sont superposées à la droite $x = y$; plus les points sont proches de la ligne plus l'erreur est faible.

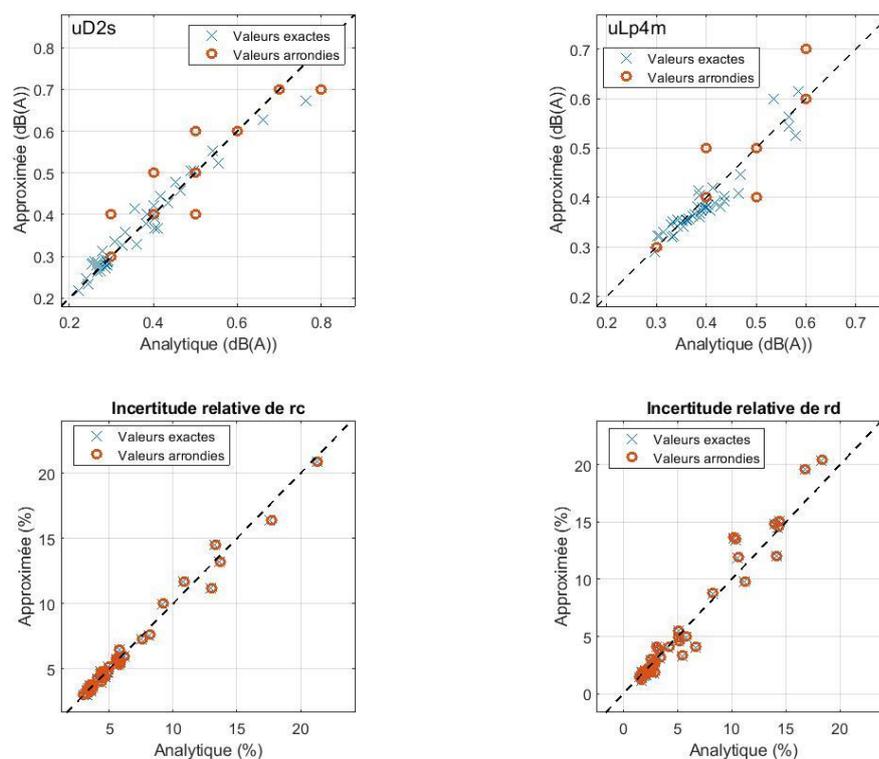


Figure B-4 : Graphes de validité des équations des incertitudes. Les croix bleues représentent les valeurs calculées à partir des équations et les ronds oranges représentent les valeurs arrondies au dixième supérieur.

La Figure B-4 montre que les points pour toutes les équations sont proches de la ligne $x = y$. Pour les distances de confort et de distraction, c'est l'incertitude de mesure relative qui est représentée. Elle est évaluée à partir de l'équation (14), où SNQ est la valeur de la distance de confort ou de distraction. Les croix bleues représentent les valeurs obtenues à partir des équations initiales et approximées, les ronds oranges celles arrondies au dixième supérieur qui sont les valeurs recommandées dans les normes.

$$u_{\text{SNQ},\%} = \frac{u_{\text{SNQ}}}{\text{SNQ}} * 100 \quad (14)$$

Pour conclure, les équations ont été simplifiées, dans un premier temps, grâce à une estimation de chacun des termes à partir des 41 lignes de mesure réalisées en entreprise. Puis, en considérant comme constante les incertitudes de niveaux et les incertitudes d'intelligibilité. Ces équations simplifiées pourraient être proposées à la prochaine révision de la norme ISO 3382-3 dédiée au mesurage des paramètres acoustiques des salles.

Annexe C. Questionnaires et revues de presse

C.1. Questionnaire Perception de l'environnement sonore

Estimez-vous que l'environnement sonore est :

Pas gênant du tout	<input type="checkbox"/>	Extrêmement gênant							
Pas bruyant du tout	<input type="checkbox"/>	Extrêmement bruyant							
Pas fatiguant du tout	<input type="checkbox"/>	Extrêmement fatiguant							

C.2. Questionnaire MFI20

- Je me sens en forme
Oui, c'est vrai Non, ce n'est pas vrai
- Physiquement, je ne me sens pas capable de faire grand-chose
Oui, c'est vrai Non, ce n'est pas vrai
- Je me sens actif(ve)
Oui, c'est vrai Non, ce n'est pas vrai
- J'ai envie de faire des tas de choses agréables
Oui, c'est vrai Non, ce n'est pas vrai
- Je me sens fatigué(e)
Oui, c'est vrai Non, ce n'est pas vrai
- Je pense que je fais beaucoup de choses dans une journée
Oui, c'est vrai Non, ce n'est pas vrai
- Quand je fais quelque chose, je peux me concentrer dessus
Oui, c'est vrai Non, ce n'est pas vrai
- Physiquement, je peux faire beaucoup
Oui, c'est vrai Non, ce n'est pas vrai
- Je redoute d'avoir des choses à faire
Oui, c'est vrai Non, ce n'est pas vrai

10. Je pense que je ne fais pas grand-chose dans une journée
 Oui, c'est vrai Non, ce n'est pas vrai
11. J'arrive bien à me concentrer
 Oui, c'est vrai Non, ce n'est pas vrai
12. Je me sens reposé(e)
 Oui, c'est vrai Non, ce n'est pas vrai
13. Me concentrer sur quelque chose me demande beaucoup d'effort
 Oui, c'est vrai Non, ce n'est pas vrai
14. Physiquement, je me sens en mauvais état
 Oui, c'est vrai Non, ce n'est pas vrai
15. J'ai un tas de projets
 Oui, c'est vrai Non, ce n'est pas vrai
16. Je me fatigue facilement
 Oui, c'est vrai Non, ce n'est pas vrai
17. Je mène peu de chose à bien
 Oui, c'est vrai Non, ce n'est pas vrai
18. Je n'ai rien envi de faire
 Oui, c'est vrai Non, ce n'est pas vrai
19. Mes pensées s'égarer facilement
 Oui, c'est vrai Non, ce n'est pas vrai
20. Physiquement, je me sens en parfait état
 Oui, c'est vrai Non, ce n'est pas vrai

C.3. Questionnaire ICA

1. A l'instant présent, avez-vous des difficultés à vous concentrer ?

Pas du tout Tout à fait

2. A l'instant présent, vous sentez-vous énergique ?

Pas du tout Tout à fait

3. A l'instant présent, vous sentez-vous stressé ?

Pas du tout Tout à fait

4. A l'instant présent, vous sentez-vous inquiet ?

Pas du tout Tout à fait

5. Avez-vous eu dans l'heure précédente des moments de somnolence ?

Pas du tout Tout à fait

6. A l'instant présent, souffrez-vous de douleurs physiques ?

Pas du tout Tout à fait

7. Si, en ce moment, vous exerceriez une activité physique, pensez-vous que vous seriez performant ?

Pas du tout Tout à fait

8. La tâche que vous effectuez en ce moment requiert-elle pour vous une grande précision ou minutie ?

Pas du tout Tout à fait

9. Réussissez-vous sans effort cette tâche ?

Pas du tout Tout à fait

10. La tâche que vous effectuez en ce moment vous demande-t-elle de prendre en compte beaucoup d'informations ?

Pas du tout Tout à fait

11. La tâche que vous effectuez en ce moment vous demande-t-elle de mémoriser beaucoup d'éléments ?

Pas du tout Tout à fait

12. Est-ce que vous disposez de toutes les informations pour effectuer la tâche demandée ?

Pas du tout Tout à fait

13. Avez-vous l'impression d'avoir à considérer des informations qui ne vous sont pas utiles pour effectuer la tâche demandée ?

Pas du tout Tout à fait

14. Estimez-vous que la tâche effectuée soit répétitive ?

Pas du tout Tout à fait

15. Estimez-vous la tâche demandée comme étant stimulante ?

Pas du tout Tout à fait

16. Estimez-vous l'interruption de l'exécution de la tâche demandée comme étant perturbante pour vous ?

Pas du tout Tout à fait

17. Estimez-vous l'environnement de travail comme trop humide ?

Pas du tout Tout à fait

18. Estimez-vous l'environnement de travail comme trop sec ?

Pas du tout Tout à fait

19. Estimez-vous l'environnement de travail comme trop froid ?

Pas du tout Tout à fait

20. Estimez-vous l'environnement de travail comme trop chaud ?

Pas du tout Tout à fait

21. Estimez-vous l'environnement de travail comme trop bruyant ?

Pas du tout Tout à fait

22. Estimez-vous l'environnement de travail comme trop sombre ?

Pas du tout Tout à fait

23. Estimez-vous l'environnement de travail comme trop lumineux ?

Pas du tout Tout à fait

24. Avez-vous rencontré lors de l'exécution de la tâche demandée des difficultés que vous n'avez pas réussi à résoudre ?

Pas du tout Tout à fait

25. Vous sentez-vous capable d'expliquer à une autre personne la tâche à exécuter ?

Pas du tout Tout à fait

26. Avez-vous l'impression d'avoir gagné en efficacité depuis le début de l'activité ?

Pas du tout Tout à fait

27. Pensez-vous parvenir facilement à reprendre l'activité là où vous l'avez laissée ?

Pas du tout Tout à fait

28. Jusqu'à présent, pensez-vous avoir fait du travail de qualité ?

Pas du tout Tout à fait

29. Jusqu'à présent, est-ce que cette tâche vous a permis d'apprendre des choses ?

Pas du tout Tout à fait

30. Jusqu'à présent, cette tâche vous donne-t-elle envie de vous investir ?

Pas du tout Tout à fait

31. Jusqu'à présent, prenez-vous du plaisir à la tâche demandée ?

Pas du tout Tout à fait

C.4. Dossiers de revue de presse

Dossier 1 : Le retrait américain d'Afghanistan

- En Afghanistan, « c'est comme si la vie s'était brusquement arrêtée », L.Masseguin, E. Moysan, J. Lecot, M. Thomas et C. Paugam pour *Libération* (31 août 2021)
- « L'idée que les Occidentaux sont démunis face aux talibans est totalement fautive », L. Mathieu pour *Libération* (31 août 2021)
- 31 août 2021: l'Amérique s'efface devant les talibans, T. Berthemet pour *Le Figaro* (31 août 2021)
- La retraite de Kaboul, une déroute qui pouvait être évitée, A. Jaulmes pour *Le Figaro* (31 août 2021)
- Afghanistan: les faux pas de Londres suscitent la polémique, A. De La Grange pour *Le Figaro* (31 août 2021)
- En Afghanistan, le jour d'après le départ des Etats-Unis, J. Follorou pour *Le Monde* (1er septembre 2021)

Dossier 2 : L'invasion du Capitole aux États-Unis

- Capitole envahi : le récit de l'insurrection qui a ébranlé l'Amérique, *Libération* (6 janvier 2021)
- Capitole : une tentative de coup d'Etat qui s'inscrit dans une guerre raciale, E. Cyna pour *Libération* (10 janvier 2021)
- Invasion du Capitole: l'incompréhensible absence et l'amateurisme des forces de sécurité, T. Berthemet pour *Le Figaro* (7 janvier 2021)
- Lors des émeutes au Capitole des Etats-Unis, un incroyable dysfonctionnement policier, S. Le Bars pour *Le Monde* (8 janvier 2021)
- Comment Donald Trump a assisté imperturbable à l'assaut du Capitole, A. Jaulmes pour *Le Figaro* (12/01/2021)
- Assaut du Capitole : « Cette crise montre à quel point Trump est parvenu à détourner le Parti républicain de ses principes », G. Kabaservice, traduit par V. Morizot pour *Le Monde* (13 janvier 2021)

Dossier 3 : Le Rapport Sauvé sur la pédocriminalité dans l'Église

- Affaire Barbarin : la Cour de Cassation rejette le pourvoi des victimes, P. Gonzalès et J.-M. Guénois pour *Le Figaro* (14 avril 2021)
- Pédocriminalité dans l'Église : L'institution après la déflagration, B. Sauvaget pour *Libération* (6 octobre 2021)
- Abus sexuels dans l'Église : ce qu'il faut retenir du rapport Sauvé, C. Hoyeau et C. Henning pour *La Croix* (5 octobre 2021)

- Rapport Sauvé : vers une redéfinition des agressions sexuelles dans le droit de l'Église ?, L. Besmond de Senneville pour *La Croix* (9 novembre 2021)
- Abus sexuels : le secret de confession est-il « plus fort que les lois de la République » ?, X. Le Normand pour *La Croix* (7 octobre 2021)

Dossier 4 : L'opposant politique russe Navalny

- Qui veut la peau de l'opposant Navalny ?, L. Jacques pour *Libération* (20 août 2020)
- Vladimir Poutine déstabilisé par la miraculeuse résurrection berlinoise d'Alexeï Navalny, P. Avril et A. Barluet pour *Le Figaro* (18 septembre 2020)
- Affaire Navalny : « Pour le Kremlin, ce n'est pas un Watergate, juste un nid-de-poule sur la route », V. Dorman pour *Libération* (25 décembre 2020)
- De l'empoisonnement à l'étouffement : un an de guerre totale contre le camp Navalny, B. Vitkine pour *Le Monde* (19 août 2021)
- Un docu de Navalny raconte Vladimir Poutine, « l'homme le plus riche du monde », V. Dorman pour *Libération* (20 janvier 2021)

Dossier 5 : La crise des sous-marins australiens

- Sous-marins : Biden torpille le « contrat du siècle » entre la France et l'Australie, les leçons d'un Trafalgar indopacifique, S. Falletti pour *Le Figaro* (16 Septembre 2021)
- Crise des sous-marins : qu'est-ce que l'Indopacifique ?, A. Contansais Pervinquière et G. Balavoine pour *Le Figaro* (23 Septembre 2021)
- Dans l'Indo-Pacifique, la Chine défend son hégémonie, A. Vaulerin pour *Libération* (17 Septembre 2021)
- Sous-marins australiens : des risques de prolifération nucléaire dans la zone indo-pacifique, N. Guibert et E. Vincent pour *Le Monde* (17 Septembre 2021)
- Entre la Chine et les Etats-Unis, une difficile « troisième voie » française, P. Richard pour *Le Monde* (21 Octobre 2021)
- Crise avec Washington: l'inquiétant désintérêt européen, I. Lasserre pour *Le Figaro* (21 Septembre 2021)

Dossier 6 : La gestion de la COVID au Brésil

- Au Brésil, Bolsonaro en campagne anti-vaccinale, M. Leclercq pour *Le Figaro* (28 Décembre 2020)
- Brésil : un effondrement sanitaire sans précédent, C. Rayes pour *Libération* (14 Avril 2021)
- Brésil : en pleine pandémie de Covid, des responsables locaux ont détourné des fonds alloués à la santé, J. Casez pour *Libération* (7 Juin 2021)
- Au Brésil, l'image de Bolsonaro écornée par les scandales concernant l'achat de vaccins contre le Covid-19, B. Meyerfeld pour *Le Monde* (1er Juillet 2021)

- Covid-19: les douteuses expériences médicales au Brésil, D. Jeantet pour *Le Figaro* (12 Octobre 2021)
- « Charlatanisme », « homicide volontaire » : le Sénat brésilien accable Bolsonaro pour sa gestion du Covid-19, C. Rayes pour *Libération* (20 Octobre 2021)
- La gestion « criminelle » de la pandémie de Jair Bolsonaro au Brésil, A. Vigna pour *Le Monde* (21 Octobre 2021)

Dossier 7 : La COP26 à Glasgow

- Climat: à Glasgow, une COP26 pour rien?, J. Waintraub pour *Le Figaro* (29 octobre 2021)
- COP26 : sur la voie d'un réchauffement limité à 2°C en 2100?, M. Cherki pour *Le Figaro* (9 novembre 2021)
- Simon Stiell : « Pendant que les pays puissants continuent de délibérer, la mer continue de monter et nous, on continue de lutter », A. Garric pour *Le Monde* (15 novembre 2021)
- A l'issue de la COP26, le réchauffement climatique toujours loin d'être contenu à 1,5 °C, A. Garric pour *Le Monde* (14 novembre 2021)
- COP26 : pour Jean Jouzel, « le problème, c'est le fossé entre les textes et la réalité », C. Schaub pour *Libération* (13 novembre 2021)
- « Pacte de Glasgow » à la COP26 : échec et climat, C. Schaub pour *Libération* (14 novembre 2021)

Dossier 8 : Les tensions franco-britanniques autour des accords de pêche

- Pêche à Jersey : ligne sous haute tension entre Londres et Paris, R. Boulho pour *Libération* (29 septembre 2021)
- Pêche : après le Brexit, avis de tempête dans l'Atlantique Nord, E. Albert pour *Le Monde* (4 octobre 2021)
- Les Britanniques ont-ils tenu leurs engagements sur les droits de pêche ?, P. Marion pour *Le Figaro* (29 octobre 2021)
- Pêche post-Brexit : Macron et Johnson s'expliquent et divergent sur une éventuelle « désescalade », P. Ricard et C. Ducourtieux pour *Le Monde* (31 octobre 2021)
- Pêche post-Brexit : la grande brouille franco-britannique, A. De La Grange pour *Le Figaro* (1er novembre 2021)
- Conflit sur la pêche : la France saborde son ultimatum, des négociations jusqu'à jeudi avec le Royaume-Uni, *Libération* et AFP (2 novembre 2021)
- Pêche : 5 questions sur le conflit entre Paris et Londres, T. Pontiroli pour *Les Echos* (3 novembre 2021)



FOLIO ADMINISTRATIF

THESE DE L'INSA LYON, MEMBRE DE L'UNIVERSITE DE LYON

NOM : LENNE

DATE de SOUTENANCE : 7/10/2022

Prénoms : Lucas Marcel Gustave

TITRE : Gêne dans les bureaux ouverts : Incertitudes des indicateurs de la norme ISO 3382 3 et proposition d'amélioration de la norme ISO 22955

NATURE : Doctorat

Numéro d'ordre : 2022LYSEI0080

Ecole doctorale : ED162 : Mécanique, Énergétique, Génie civil, Acoustique

Spécialité : Acoustique

RESUME :

La qualité acoustique des bureaux ouverts est évaluée au travers de la capacité de l'aménagement à limiter la propagation du bruit de parole, qui constitue la source principale de gêne dans ces espaces de travail. Pour cela, deux normes sont disponibles : la norme ISO 3382-3 qui est une norme de mesurage et la norme ISO 22955 qui fixe des valeurs cibles pour le local et l'environnement sonore.

La norme ISO 3382-3 définit des indicateurs caractérisant la décroissance spatiale du niveau de la parole et de son intelligibilité et en fixe des valeurs d'incertitudes. Cependant, ce dernier point est encore sujet à discussion. Une étude spécifique a été réalisée dans ce travail de thèse sur la base de développements analytiques et de simulations numériques. Cette étude met en évidence que les incertitudes des indicateurs sont relativement faibles et peuvent être estimées à l'aide d'expressions simples. Elle souligne également qu'il est problématique de caractériser la performance acoustique d'un bureau à l'aide d'une valeur unique des indicateurs, comme le préconise la norme.

La norme ISO 22955 fixe des valeurs cibles pour les indicateurs et traite des bureaux hébergeant plusieurs activités, pour lesquels les indicateurs existants sont inadaptés. Pour cela, elle s'appuie sur une nouvelle approche basée sur l'animation (liveliness) des activités réalisées. Une expérience de laboratoire, étudiant la pertinence de cette approche, a été réalisée. Huit conditions sonores ont été simulées à partir de la superposition d'une discussion provenant d'un espace de pause ou d'un centre d'appels et d'un bruit de ventilation. 32 sujets devaient réaliser une revue de presse durant 35 minutes. Leur perception de l'environnement sonore, leur fatigue ressentie et la charge mentale de travail ont été évaluées. Les résultats mettent en évidence que le type de discussion impacte significativement les effets du bruit lorsque la parole est intelligible.

MOTS-CLÉS : Acoustique, Bruit, Bureau ouvert, ISO 3382-3, Incertitudes de mesure, ISO 22955, Gêne, Fatigue, Charge mentale de travail

Laboratoire (s) de recherche : Laboratoire Vibrations Acoustique

Directeurs de thèse: Étienne PARIZET et Patrick CHEVRET

Président de jury :

Composition du jury : Édith GALY (Rapporteure), Judicaël PICAUT (Rapporteur), Tapio LOKKI (Examinateur), Étienne PARIZET (Co-directeur), Patrick CHEVRET (Co-directeur), Jack HARVIE-CLARK (Invité)