



Le bruit dans les open-spaces : acoustique et perception.

Le bruit dans les open-spaces : acoustique et perception.

Patrick Chevret

NS 352
juin 2017

Le bruit dans les open-spaces : acoustique et perception.

Patrick CHEVRET

Résumé

Cette note scientifique est un extrait de l'habilitation à diriger des recherches de P. CHEVRET, habilitation dont la soutenance a eu lieu le 2 mars 2017 à l'INRS.

Le bruit dans les open-spaces est un problème de santé publique comme le révèlent les indicateurs d'arrêt maladie et les enquêtes de terrains en France comme à l'étranger. Depuis une décennie environ, l'auteur mène, au laboratoire d'Acoustique au Travail de l'INRS, des travaux de recherches sur les mécanismes sonores qui contribuent à l'insatisfaction des salariés des open-spaces. Ces recherches l'ont conduit à analyser les facteurs physiques du bruit et le rôle spécifique joué par le local de travail lui-même ainsi que les facteurs humains et leur grande variabilité. Ce document vise à faire un point sur les résultats les plus récents obtenus à l'INRS comme dans d'autres laboratoires de recherches travaillant sur le sujet du bruit dans les open-spaces. Ces résultats étant toujours observés à l'aune de leur apport sur le terrain de la prévention des risques professionnels.

Abstract

Noise in open-plan offices is a major public health issue as revealed by indicators of sick leave and field surveys in France and abroad. For about a decade, the author has been conducting research in the Laboratory of Occupational Acoustics of INRS on sound mechanisms that contribute to the dissatisfaction of employees of open-plan offices. This research led him to analyse the physical factors of noise and the specific role of the workplace itself as well as human factors and their great variability. The purpose of this document is to review the most recent results obtained at INRS as well as in other research laboratories working on noise in open-plan offices. These results are always observed in the light of their contribution to the field of occupational risk prevention.

SOMMAIRE

Introduction	9
Le bruit dans les open-spaces	9
L'acoustique des open-spaces	13
1. Les enjeux de la modélisation	14
2. Le Modèle Géométrique Energétique (MGE)	15
3. Le problème spécifique de la diffraction	20
4. Détermination des « valeurs uniques »	28
4.1. Niveau de pression par bande d'octave	29
4.2. Atténuation poste à poste	30
4.3. Le taux de décroissance spatiale	31
4.4. Le temps de réverbération	36
4.5. Conclusion	40
Les effets du bruit de parole sur les fonctions cognitives	43
1. Effets indésirables du bruit (ISE)	44
2. Indicateurs pour évaluer l'intelligibilité en open-space	46
3. Evaluation de l'ISE à l'aide d'un indicateur d'intelligibilité	56
3.1. Mesure objective de l'ISE	57
3.2. Mesure subjective de l'ISE	60
4. Discussion sur l'applicabilité des connaissances concernant l'ISE	61
Impact réel du bruit sur les salariés travaillant en open-spaces	69
1. Le questionnaire GABO	70
2. Perception de l'environnement de travail en open-space	71
3. Perception du bruit dans l'open-space	73
4. Nécessité d'une typologie d'open-space	75
4.1. Les centres d'appels	77
4.2. Les plateaux collaboratifs	78
4.3. Les espaces administratifs	78
4.4. Les halls d'accueil du public	79
4.5. Effets du type d'open-space	81
Projet pour l'amélioration de l'ambiance sonore dans les open-spaces	85
1. Apporter les connaissances et les outils aux préventeurs en entreprise	85
2. Compléter les tests en laboratoire	88
3. Multiplier les interventions de terrain	90
4. Réaliser un système d'évaluation de l'exposition aux bruits de parole	92

Introduction

Le bruit dans les open-spaces

Les arguments généralement avancés par ceux qui promeuvent le développement des open-spaces sont nombreux : l'amélioration de la communication et des relations au travail, la fluidité de la transmission des informations donc l'amélioration de la rentabilité, la modernité de l'architecture. Il faut reconnaître que certaines entreprises du secteur tertiaire ont fait des efforts pour prendre en compte les facteurs humains lors de la réalisation ou du réaménagement de leurs bureaux ouverts. Cependant, une très grande disparité existe encore en France et l'on trouve souvent, lors de nos interventions en entreprise, des environnements de travail où l'hyper-rentabilité fait loi. En témoignent, ces panneaux lumineux souvent érigés en totem dans les centres d'appels, au-dessus de la tête des salariés et qui leur indiquent en temps réel leurs performances, le nombre d'appels manqués, le nombre d'appels en attente, etc. (figure 1). Le plus éloquent est encore le type de slogans publicitaires utilisés pour vendre ces outils aux entreprises. Par exemple, cet argument de vente trouvé sur internet : « Augmentez la productivité et supervisez vos équipes de près grâce aux logiciels de centre d'appels »

Figure 1
Exemple de panneau indiquant aux salariés leurs performances et autres informations sensées augmenter leur productivité.



En réalité, la motivation principale pour la conception des open-spaces est souvent la réduction des coûts de fabrication et d'aménagement des locaux et le gain de surface. Cependant, le gain de rentabilité n'est pas démontré et surtout les coûts indirects, notamment ceux liés aux absences pour maladie, sont sous-estimés, sans parler des dépenses induites pour la caisse primaire d'assurance maladie. (Pejtersen et al., 2011) ont par exemple démontré, sur la base d'une enquête auprès de 2403 salariés de bureaux en Finlande, que ceux d'entre eux qui occupaient un bureau de plus de 6 personnes avaient de façon significative plus de jours d'absence pour maladie que ceux qui travaillaient en bureau individuel.

Le bruit est l'un des tous premiers, si ce n'est le premier, facteur de gêne pour les occupants des open-spaces. Toutes les études s'accordent pour le dire. Il est corrélé significativement avec l'absentéisme (Fried et al., 2002), avec la satisfaction au travail, le bien-être, le sentiment de privacité (De Croon et al., 2005).

Une fois ce constat établi, que faut-il faire ? Sur le terrain, les acteurs de la prévention ont besoin d'informations et de formation, d'outils de prévision, de méthodes de mesurage, de recommandations adaptées parce que, nous l'avons vu, les enjeux sont importants pour l'économie et la santé publique mais aussi parce que le problème est complexe, multifactoriel. Il engage en effet des connaissances à la fois dans le domaine des sciences physiques, en particulier l'acoustique, et dans le domaine des sciences humaines comme l'ergonomie et la psychologie. Traiter du bruit dans les open-spaces, c'est donc forcément s'intéresser à l'acoustique du local, c'est-à-dire aux effets que peuvent avoir l'aménagement, les matériaux sur la propagation des sources de bruit. Mais c'est aussi s'interroger sur la perception du bruit par les individus et notamment à ses effets à court, moyen et long termes sur la performance, la gêne ressentie ou la fatigue.

Le présent document est structuré sur la dualité du bruit entre acoustique et sciences humaines. La première partie discute, au travers des travaux que j'ai réalisés à l'INRS, des spécificités de l'acoustique des open-spaces par rapport aux autres locaux de travail. Nous verrons que la prévision des niveaux sonores nécessite des modèles de calcul optimisés en raison de la taille et de la complexité de l'environnement de propagation et parce que les informations d'entrée de ces modèles sont souvent approximatives et incomplètes. Nous montrerons qu'un modèle de type géométrique

énergétique s'avère être un excellent compromis entre temps et précision de calcul. La troisième partie de ce travail est centrée sur les individus et notamment sur la perception qu'ils ont de l'environnement sonore dans l'entreprise. Nous étudierons ce point au travers de résultats d'enquêtes réalisées à l'international mais surtout par le prisme d'une enquête réalisée par l'INRS en 2014 auprès de plusieurs centaines de salariés d'open-spaces, à l'aide d'un questionnaire spécifique issu d'un partenariat entre l'INSA de Lyon et l'INRS. Comme un pont jeté entre l'acoustique et les sciences humaines, la deuxième partie de ce document met l'accent sur les tests en laboratoire qui sont la pierre angulaire de l'édifice. Ces tests sont déterminants car ils doivent permettre de définir les grandeurs physiques qui sont les plus représentatives des effets indésirables du bruit (ISE) sur les fonctions cognitives. L'accent sera mis en particulier sur les effets de la parole intelligible qui est la source de bruit perçue comme la plus gênante par les occupants d'open-space. Je présenterai dans cette partie les principaux tests en laboratoire réalisés à ce jour, leurs limites et les pistes de progrès pour l'avenir.

Enfin, dans la quatrième et dernière partie, je présenterai les perspectives vues avec l'œil du préventeur en entreprise. Elles se situent sur les trois niveaux que nous avons détachés lors de notre analyse : les outils, les essais en laboratoire et les observations en entreprise.

Références bibliographiques

- De Croon, E., J. Sluiter, P. P. Kuijer and M. Frings-Dresen (2005). "The effect of office concepts on worker health and performance: a systematic review of the literature." *Ergonomics* **48**(2): 119-134.
- Fried, Y., S. Melamed and H. A. Ben-David (2002). "The joint effects of noise, job complexity, and gender on employee sickness absence: An exploratory study across 21 organizations—the CORDIS study." *Journal of Occupational and Organizational Psychology* **75**(2): 131-144.
- Pejtersen, J. H., H. Feveile, K. B. Christensen and H. Burr (2011). "Sickness absence associated with shared and open-plan offices—a national cross sectional questionnaire survey." *Scandinavian Journal of Work, Environment & Health*: 376-382.

Chapitre 1

L'acoustique des open-spaces

D'un point de vue purement physique, l'open-space possède plusieurs points de différenciation par rapport aux autres espaces de travail, tels que les halls à grands volumes, fortement réverbérants, du secteur industriel, ou les bureaux individuelles et les petits bureaux collectifs du secteur tertiaire. Tout d'abord, *la géométrie* de l'open-space a ceci de spécifique qu'elle ressemble en général à un parallélépipède aplati. La surface au sol peut atteindre plusieurs milliers de mètres carrés et la hauteur seulement 2,50 m. Le son produit dans cet espace est canalisé comme dans un guide d'ondes, favorisant les interactions avec le sol et le plafond. Une grande part de l'ambiance sonore sur le plateau se joue donc au niveau de l'absorption par ces deux surfaces. Dans les open-spaces de plus petites dimensions, les murs viennent ajouter leur contribution à l'ensemble du mélange sonore composé des multiples réflexions sol-plafond.

Ensuite, dans un bureau ouvert, l'espace est partiellement ou totalement décroisonné et ce *sont les éléments de mobilier* qui servent à isoler les personnes. Ce sont par exemple les armoires, les plantes ou, dans le meilleur de cas, des cloisons amovibles posées sur le sol ou sur les bureaux, cloisons qui

sont d'ailleurs plus ou moins bien traitées d'un point de vue acoustique. Le mobilier joue donc un rôle tout aussi important que le sol et ou plafond dans la composition du champ sonore intérieur.

Côté modélisation, il y a deux difficultés liées à la présence du mobilier. La première réside dans la complexité des phénomènes mis en jeu au cours de la propagation, la prise en compte des phénomènes de diffraction notamment. La seconde difficulté est relative à l'imprécision des données d'entrée du modèle. Il est en effet tout à fait impossible de connaître les propriétés acoustiques des matériaux installés sur un plateau. De même, la position réelle des éléments de mobilier ainsi que leur géométrie ne peuvent être décrites qu'imparfaitement. Le modèle de prévision doit trouver le bon compromis entre précision et exigences des utilisateurs, qui sont doubles : d'une part, les prévisions doivent pouvoir s'accomplir dans des temps compatibles avec les projets de constructions neuves ou de réhabilitation des espaces. D'autre part, elles doivent aboutir aux valeurs uniques que recommandent les normes.

L'objet de ce chapitre est de préciser les principaux enjeux du point de vue du préventeur, pour ce qui concerne l'acoustique des open-spaces. Ces enjeux sont guidés par les contraintes des projets d'aménagement ou de réaménagement des espaces de travail. Ils se situent, d'une part, au niveau des modèles de calcul qui doivent s'adapter à la complexité de l'aménagement intérieur. Nous verrons qu'un modèle de type géométrique énergétique est certainement le meilleur compromis précision/temps d'estimation. D'autre part, ils se situent au niveau de la définition des valeurs uniques pour la caractérisation acoustique des locaux. Nous ferons donc un point des connaissances sur les modèles et nous verrons de quelle manière l'INRS a contribué à la définition des indicateurs et des valeurs cibles que l'on trouve dans les travaux normatifs les plus récents.

1. Les enjeux de la modélisation

Les modèles numériques pour la prévision de l'acoustique des bureaux ouverts doivent s'adapter aux contraintes spécifiques de cet environnement, à savoir la complexité et les incertitudes de l'aménagement intérieur, ainsi qu'aux exigences des concepteurs et des utilisateurs de ces espaces.

Grâce en grande partie aux progrès des technologies de l'informatique, les modèles ne cessent d'évoluer, même si le socle théorique se situe toujours dans l'une des trois grandes familles que sont les méthodes statistiques ou de champ diffus, les méthodes ondulatoires et les méthodes géométriques. Les méthodes de champ diffus, dont la théorie de Sabine est la plus emblématique, supposent une répartition homogène de la densité d'énergie dans l'espace. Les méthodes ondulatoires visent à résoudre l'équation des ondes en discrétisant l'espace ou les surfaces qui le délimitent. Les théories géométriques décomposent le champ acoustique en une série de rayons ou de particules indépendantes. La description de ces grandes familles, des méthodes dérivées et de leur domaine d'application se trouvent dans un grand nombre de publications dont (Chevret and Chatillon, 2012). Au-delà de cette répartition formelle des méthodes, il existe bien entendu, une très grande quantité de modèles qui, selon le contexte, assemblent des briques des unes ou des autres.

Le modèle de (Jean et al., 2016) est un exemple intéressant pour les open-spaces, basé sur l'hybridation d'une méthode éléments de surface (ondulatoire ou « full wave ») et d'une méthode de sources images (géométrique).

In fine, le choix de l'une ou l'autre de ces méthodes dépend du domaine d'application et de la résolution spatiale, fréquentielle ou temporelle souhaitées. En l'occurrence, les principales caractéristiques des bureaux ouverts sont les grandes dimensions du local, un encombrement important de l'espace et un nombre de sources pouvant atteindre parfois plusieurs centaines. La bande de fréquence qui intéresse le préventeur est celle couverte par les octaves de 125 Hz à 8 kHz correspondant à l'étendue spectrale des principales sources de bruit sur un plateau. Compte-tenu de ces caractéristiques, un modèle géométrique énergétique est un excellent candidat pour la prévision des niveaux sonores.

2. Le Modèle Géométrique Énergétique (MGE)

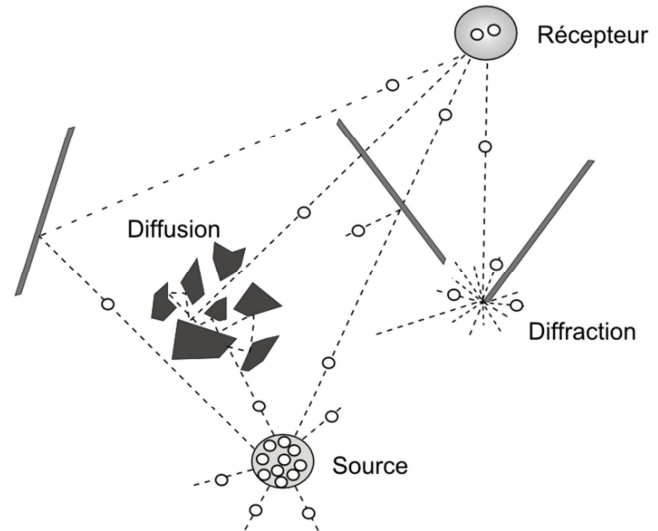
Rayplus est le logiciel de calcul acoustique prévisionnel emblématique de l'INRS. Il a été développé vers la fin des années 80 par (Ondet and Barbry, 1989) pour la modélisation dans les locaux industriels. Il est aujourd'hui distribué à tous les acteurs du réseau de prévention de l'INRS comme les caisses d'assurance retraite et de la santé au travail (CARSAT), les préventeurs en entreprise et les bureaux d'études impliqués dans l'amélioration des conditions de travail. Plus d'une centaine de licences a été délivrée à ce jour.

Rayplus fait partie de la famille des modèles géométriques (MG). Par opposition aux méthodes ondulatoires (« full wave ») pour lesquelles le champ acoustique en tout point de l'espace interagit avec l'ensemble de l'environnement au travers du Laplacien de l'équation des ondes, l'onde acoustique est décomposée en rayons (ou particules) indépendant(e)s qui chacun(e) rencontre des obstacles et « vit » sa propre histoire (Kuttruff, 2009). Le principal avantage de cette méthode est que l'accroissement de la complexité de l'environnement de propagation ne se traduit pas forcément par une augmentation de la complexité de résolution, ni par une augmentation des temps de calcul. Par contre, l'hypothèse d'indépendance des particules les unes vis-à-vis des autres a pour conséquence d'en faire une approche utilisable principalement en moyennes et hautes fréquences.

Dans l'ensemble, les lois qui régissent le tracé de particules sont des lois géométriques (figure 2). Si le milieu de propagation est homogène, elles voyagent en ligne droite, sinon leur trajet s'incurve au gré des variations de l'indice de réfraction. Lorsqu'elles rencontrent un obstacle, elles se séparent en deux particules (ou trajets), l'une réfléchi(e) selon la loi de Snell-Descartes et l'autre transmise à travers l'obstacle. Selon le modèle, une particule qui rencontre un bord ou une arête se sépare en une multitude de particules diffractées dont la somme des énergies est égale à l'énergie de la particule initiale. Lorsque le milieu de propagation est encombré par une grande quantité d'objets, il est possible d'appliquer au modèle une description statistique de diffusion. Selon la densité d'encombrement, un libre parcours moyen est alors déterminé pendant lequel la particule n'est pas

affectée. Dès que cette distance est atteinte, elle est déviée de façon aléatoire puis elle continue son parcours (Ondet and Barbry, 1989).

Figure 2
Illustration en 2D des chemins possibles pour une particule acoustique entre une source et une cellule de réception.

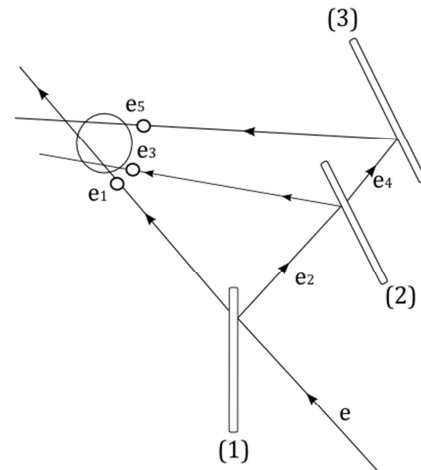


Dans le modèle géométrique de Rayplus, la source sonore est constituée d'une multitude de particules (plusieurs centaines de milliers selon le volume du local et la taille de la cellule qui collecte les particules au niveau du récepteur). A l'émission, la direction de la particule est déterminée au moyen d'une méthode de Monte-Carlo, les angles sphériques étant calculés de façon aléatoire sur la base d'une densité de probabilité uniforme. Chaque particule peut être suivie au cours du trajet en tenant compte de la perte atmosphérique, des pertes par absorption et par transmission au travers les matériaux. Au final, l'énergie dans la cellule de réception est calculée selon l'expression :

$$\varepsilon(f) = \frac{\rho(f)}{n} \sum_{i=1}^m \ell_i \times \left(\prod_{j=1}^{p_i} (1 - \alpha_a(P_j, f) - \alpha_t(P_j, f)) \times \prod_{j=1}^{q_i} \alpha_t(P_j, f) \right) . \quad (1)$$

$\rho(f)$ est la puissance de la source à la fréquence f , n est le nombre de particules envoyées depuis la source, m est le nombre de particules qui pénètrent dans la cellule de réception, ℓ_i est la distance parcourue par la particule i dans la cellule de réception (ℓ_i est inférieure au diamètre de la cellule), p_i est le nombre de réflexions qu'a subi la particule depuis la source et q_i est le nombre de transmissions. $\alpha_a(P_j, f)$ et $\alpha_t(P_j, f)$ sont les valeurs des coefficients d'absorption et de transmission des matériaux du plan P_j lors de la collision j (figure 3).

Figure 3
Illustration du principe de calcul de l'énergie acoustique à partir d'un lancer de particules.



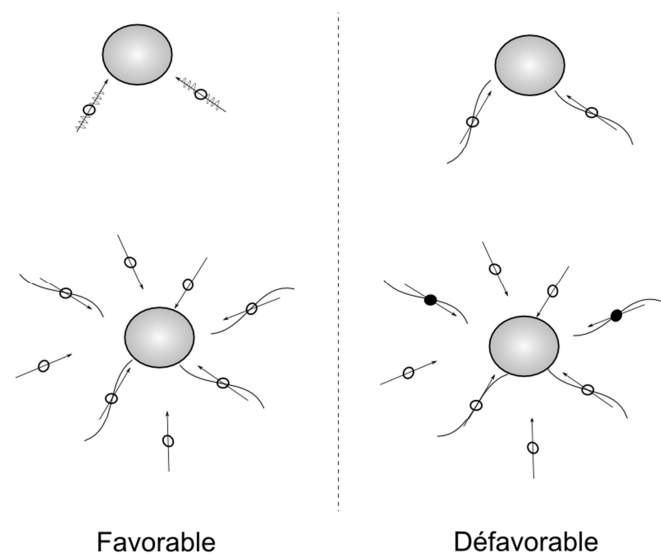
$$e_1 = \varphi / n \times l_1 \times \alpha_t(1)$$

$$e_3 = \varphi / n \times l_3 \times (1 - \alpha_a(1) - \alpha_t(1)) \times (1 - \alpha_a(2) - \alpha_t(2))$$

$$e_5 = \varphi / n \times l_5 \times (1 - \alpha_a(1) - \alpha_t(1)) \times (1 - \alpha_a(3) - \alpha_t(3)) \times \alpha_t(2)$$

La sommation énergétique réalisée au travers de l'expression 1 suppose que toutes les particules qui arrivent dans la cellule réceptrice sont indépendantes et que leurs phases sont totalement décorréliées. Ceci est d'autant plus probable que les réflexions et les directions d'arrivée des particules sont nombreuses. Le champ diffus est évidemment celui qui réalise le mieux cette condition. Une illustration des situations typiques plus ou moins favorables à l'hypothèse de sommation énergétique est présentée sur la figure 4. Remarquons que cette hypothèse est totalement compatible avec l'hypothèse hautes fréquences puisque la phase de la particule « tourne » d'autant plus vite que la fréquence est élevée. Par exemple, à 2 kHz la phase d'une particule a fait un cycle complet pendant la traversée d'une cellule de réception de 17 cm.

Figure 4
Illustration des différents cas plus ou moins favorables pour la méthode géométrique énergétique. Dans le cas, illustré par le schéma en haut à gauche, les particules hautes fréquence peuvent être additionnées de façon incohérente, même si elles sont peu nombreuses. Ce n'est pas le cas en basse fréquence (haut droite). En basse fréquence, il faut que les particules soient nombreuses et avec une densité d'énergie proches (bas, gauche). Sur la figure en bas à droite les ronds pleins symbolisent les particules de forte énergie, les ronds creux représentent celles qui sont peu énergétiques.



Dans le domaine des basses fréquences, il convient d'analyser la répartition de la densité d'énergie en fonction de l'angle solide pris depuis le récepteur. Elle doit être homogène ou le plus homogène possible afin de donner le plus de chances possibles aux phases de s'annuler en moyenne. Cette condition est favorisée si le nombre de réflexions est élevé, ce qui arrive lorsque les surfaces sont peu absorbantes et/ou lorsque le local est très encombré. Une grande partie des matériaux utilisés dans les locaux est peu absorbante jusqu'à 1 kHz (béton = 1%, plaques de plâtre = 8 %). Pour les autres, il faut compter sur les réflexions dues aux éléments intérieurs et surtout les plafonds pour faire baisser la cohérence du champ acoustique. Dans les locaux industriels réverbérants, il y a en général assez peu d'absorption. Le champ acoustique subit donc de nombreuses réflexions et finit par être quasi-diffus. Dans les bureaux, les éléments absorbants sont beaucoup plus nombreux, que ce soit le plafond ou certains éléments de mobilier comme les cloisonnettes. Le champ est alors partiellement diffus, ce sont les réflexions précoces qui dominent. Il faut compter alors sur un nombre de sources important pour homogénéiser le champ.

Donc, l'absence de phase peut avoir des conséquences négatives en basses fréquences, dans le champ direct ou modal. Cependant, dans la réalité on ne dispose pas des propriétés des matériaux avec la finesse souhaitée pour une description cohérente du champ acoustique. Seul le coefficient d'absorption en champ diffus est en général connu puisque les fabricants de matériaux ne se doivent de fournir que le coefficient d'absorption Sabine α_s par bande d'octave (ISO-EN-354, 2003) et, même si à partir de cette mesure il est possible d'extrapoler le changement de phase que subit l'onde acoustique à l'impact sur le matériau pour différentes incidences (Benedetto and Spagnolo, 1985), la démarche reste approximative. Néanmoins, ceci a déjà été fait par (Wang and Bradley, 2002) pour un modèle de sources images et pourrait être imaginé sans effort pour le modèle particulaire. Ajoutons que ces remarques sur la méconnaissance des données d'entrée valent également pour la transmission au travers des parois.

Ainsi, la question de la validité du modèle ne se limite pas aux hypothèses qui le sous-tendent (description particulaire, sommation incohérente) mais également aux incertitudes de l'environnement de propagation. Dans le cas d'un bureau ouvert, une description totalement déterministe n'est qu'un reflet de la réalité puisque l'aménagement intérieur n'est jamais connu avec précision, que le mobilier est par définition mobile, que les occupants bougent et qu'ils peuvent gérer eux-mêmes leur espace de travail. De ce fait, vouloir modéliser l'acoustique d'un tel espace s'apparente à vouloir modéliser la réponse d'une structure complexe comme celle d'un véhicule automobile soumis à une excitation vibratoire. On sait qu'en pratiquant cette mesure sur un lot de véhicules identiques en sortie de chaîne, on ne pourra éviter d'obtenir une certaine dispersion des résultats, comme le montre la fonction de transfert de la figure 5 (Kompella and Bernhard, 1993). Partant de ce constat, l'approche énergétique, s'affranchissant d'emblée de la phase, ne constitue pas une hypothèse aberrante, au vu des incertitudes de l'environnement. C'est plus discutable en basses fréquences, mais un moyennage des niveaux d'énergie sur chaque bande d'octave aura pour effet de minimiser les effets de phase. Ce moyennage est parfaitement consistant avec l'idée que le déterminisme du milieu de propagation est

une vue de l'esprit. Cette discussion est illustrée par la figure 6 qui présente un exemple de mesures réalisées dans un open-space, mesures pour lesquelles de légères modifications ont été apportées entre chaque configuration (déplacement de la source de quelques centimètres, insertion d'une plante entre la source et le récepteur). Malgré une allure très similaire pour toutes les configurations, le spectre en bande fine est très variable localement. La modélisation ne pourra jamais rentrer dans ce degré de finesse. A contrario, les variations sur le spectre d'octave sont au maximum de l'ordre de 1,5 dB.

Figure 5
Illustration de la dispersion de la fonction de transfert sur une mesure vibratoire réalisée sur 99 véhicules identiques en sortie de chaine de production. Figure tirée de (Kompella and Bernhard, 1993)

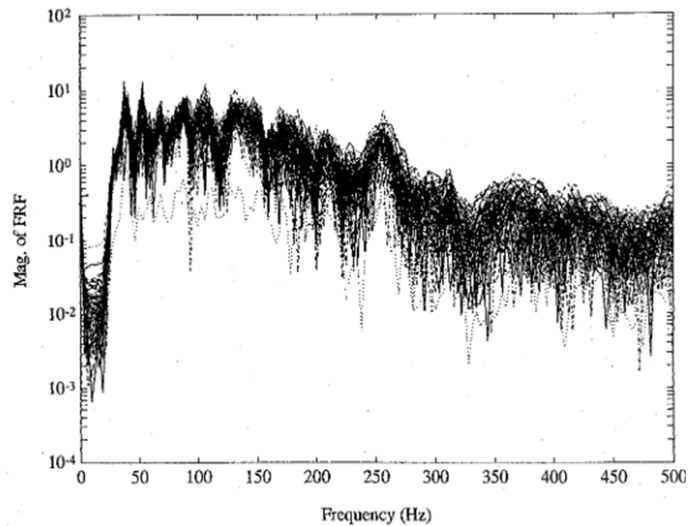
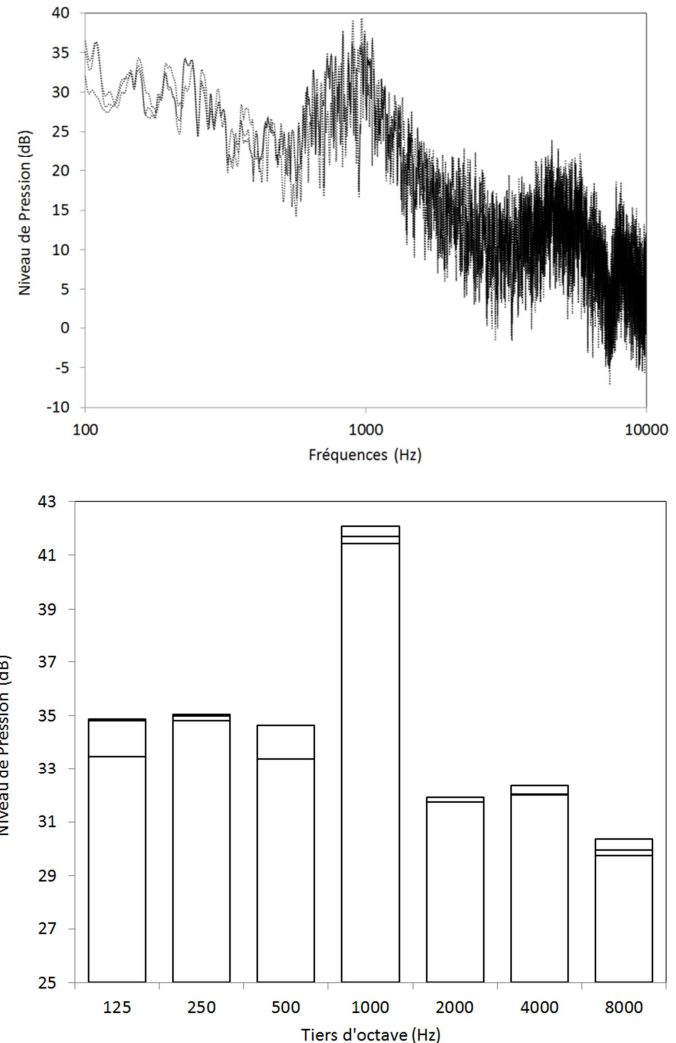


Figure 6

(a) Illustration de la dispersion du spectre en bande fine pour trois mesures successives dans les mêmes configurations de l'open-space si ce n'est que la source a été déplacée de quelques centimètres et une plante a été placée entre la source et le récepteur. Distance de séparation entre la source et le récepteur de 13 m. Mesures réalisées en l'absence des personnes. Source MLS pour suppression du bruit de fond.
(b) Effets sur le spectre en bande d'octave.



3. Le problème spécifique de la diffraction

Depuis quelques décennies, les activités relatives au secteur tertiaire (administrations, centres d'appels, etc.) se sont développées en Europe. Les espaces de bureaux se sont ouverts afin de pouvoir faire travailler le maximum de personnes dans le minimum d'espace, rentabilité exige. La modélisation acoustique de ce type de local est devenue un nouvel enjeu pour les codes de calcul prévisionnels. Les principales difficultés de la modélisation résident dans la complexité de l'aménagement intérieur, par opposition aux locaux industriels, car il est en interaction permanente avec le champ acoustique. En particulier, la présence de mobilier (bureaux, cloisonnettes, armoires) ajoute des effets de diffraction qui ne peuvent être négligés, notamment derrière les écrans qui séparent des personnes à leur poste de travail. La prise en compte de la diffraction dans un modèle géométrique peut présenter une réelle difficulté car c'est un phénomène qui lie étroitement la géométrie de l'objet diffractant et l'onde acoustique. Une description localisée, comme l'est la théorie géométrique est, *a priori*, assez peu compatible avec le phénomène. Cependant, depuis les années

1960, une extension de la théorie géométrique a été proposée par J.B Keller pour les ondes électromagnétiques (Keller, 1962). Cette théorie, appelée GTD pour Geometrical Theory of Diffraction, a été reprise dans différents domaines de l'acoustique, notamment en acoustique sous-marine pour traiter les problèmes de détection de cible. (voir (Überall, 1992) pour une revue des méthodes de diffusion par des cibles sonar, incluant la GTD). Plus récemment, (Kouyoumjian and Pathak, 1974) ont étendu la GTD afin de lever la singularité qui existe à la limite de la zone d'ombre géométrique. (McNamara et al., 1990) ont généralisé le principe à différents types d'éléments diffractants tels que les bords droits, les coins, les bords à arête courbe. Depuis 2009, mes travaux ont visé à adapter le formalisme au contexte de la diffraction acoustique par des éléments de mobilier. Plusieurs communications dans des congrès et deux publications internationales (Chevret and Chatillon, 2012; Chevret, 2015) décrivent dans le détail la démarche et les résultats de ces travaux.

Dans son principe, la méthode consiste à calculer, pour chaque particule acoustique, un coefficient de diffraction dépendant de la géométrie de la structure diffractante (arête, bord, angle,) et de l'orientation de la trajectoire de la particule. Dans leur livre, McNamara et al. ont donné, pour un bord droit, l'expression générale du coefficient de diffraction complexe, *i.e.* incluant la phase du champ de pression :

$$D = [D_1 + D_2 + D_3 + D_4] \quad , \quad (2)$$

Avec

$$\begin{aligned} D_1(k, R, S) &= D' \times F(kLa_1(\varphi' - \varphi)) \times \cot\left(\frac{\pi + (\varphi' - \varphi)}{2n}\right) \\ D_2(k, R, S) &= D' \times F(kLa_2(\varphi' - \varphi)) \times \cot\left(\frac{\pi - (\varphi' - \varphi)}{2n}\right) \\ D_3(k, R, S) &= D' \times F(kLa_1(\varphi' + \varphi)) \times \cot\left(\frac{\pi + (\varphi' + \varphi)}{2n}\right) \\ D_4(k, R, S) &= D' \times F(kLa_2(\varphi' + \varphi)) \times \cot\left(\frac{\pi - (\varphi' + \varphi)}{2n}\right) \end{aligned} \quad (3)$$

Où,

$$D'(k, r, s) = -\frac{\exp(-i\pi/4)}{2n \times \sin \beta \times \sqrt{2\pi k}} \quad (4)$$

Et où les coefficients L , a_1 and a_2 s'écrivent respectivement :

$$L = \frac{r \times s}{r + s} \times \sin^2 \beta ,$$

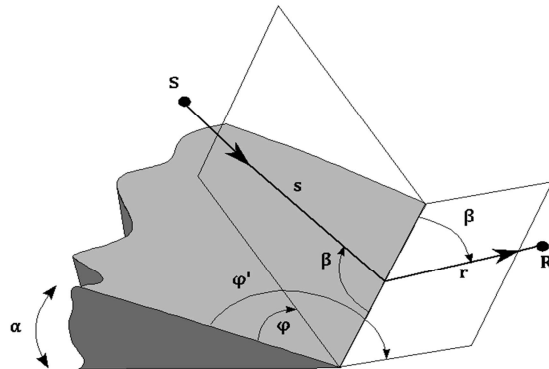
$$a_1(\xi) = 2 \times \cos^2 \left(\frac{\xi}{2} \right) ,$$

$$a_2(\xi) = 2 \times \cos^2 \left(\frac{2\pi n - \xi}{2} \right) \quad (5)$$

φ , φ' et β représentent respectivement les angles associés aux directions incidente et diffractée et n dépend de l'angle d'ouverture α du bord diffractant (figure 7). F est appelée fonction de transition.

Figure 7

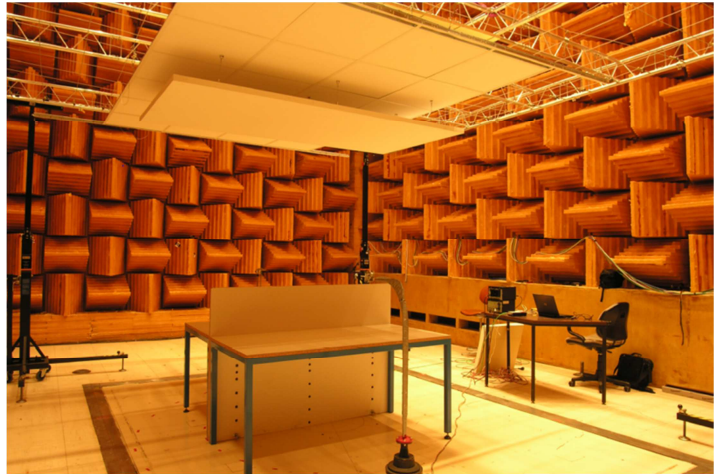
Illustration de la diffraction par un bord droit.



La théorie uniforme de la diffraction, associée au modèle géométrique avec prise en compte de la phase, constitue une version « cohérente » de Rayplus. La validation de l'approche a débuté en 2010 à l'INRS, dans le cadre d'une étude dont j'avais la responsabilité, grâce à des mesures réalisées dans la grande chambre semi-anéchoïque du laboratoire d'acoustique. Pour cela, une structure métallique a été spécialement conçue pour supporter les éléments de faux plafonds typiques qu'on rencontre dans des locaux du secteur tertiaire. La photo de la figure 8 montre cette structure qui maintient, au-dessus d'un bureau double, des panneaux à forte densité représentant un plafond rigide, en dessous desquels est placé un panneau acoustique absorbant.

Figure 8

Installation expérimentale pour la mesure de la diffraction par un écran de bureau. Les essais ont eu lieu dans la chambre semi-anéchoïque de l'INRS. Un plafond suspendu amovible est placé au-dessus d'un bureau double avec cloisonnette dont la hauteur est réglable. Plusieurs configurations de plafond ont été testées lors des essais.



A l'aide de cette installation, une étude paramétrique a été conduite en faisant varier la hauteur de la cloisonnette ainsi que les matériaux constituant le plafond (Chevret and Chatillon, 2012; Chevret, 2015). Les figures 10 à 14 illustrent les principaux résultats de cette étude.

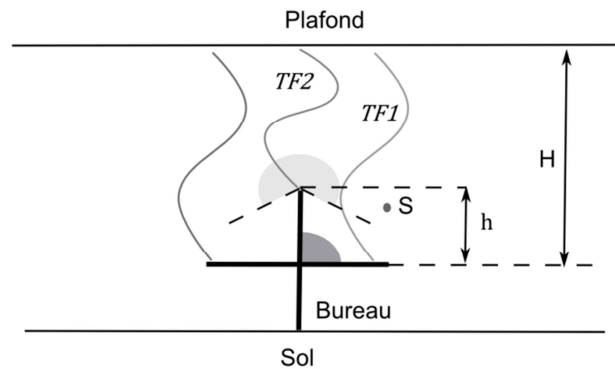
La figure 10 confirme la difficulté de l'approche géométrique à modéliser le champ acoustique en basses fréquences. L'écart constaté avec les mesures est parfois très important, en particulier dans les zones d'interférence. A contrario, une approche ondulatoire (BEM) décrit parfaitement l'ensemble du spectre jusqu'à 3 kHz (figure 11). Cependant, les temps de calcul ne sont pas du tout comparables entre les deux approches puisqu'il faut 85 heures pour l'approche ondulatoire jusqu'à 3 kHz, contre seulement quelques dizaines de secondes pour l'approche géométrique sur toute la bande de fréquences (dual-core Intel® i7-3540M CPU @ 3.0 GHz RAM 8GB).

A ce jour, il n'est donc pas possible d'envisager la modélisation d'un open-space à l'aide d'une méthode ondulatoire. Les méthodes géométriques peuvent constituer, quant-à-elles, une alternative intéressante mais à condition de bien appréhender le problème des basses fréquences, ce que nous allons tenter de faire empiriquement dans le paragraphe suivant.

Le domaine d'application de la théorie géométrique est étroitement lié à la fréquence de la source et à la géométrie du système. Les principales dimensions caractéristiques pour un bureau sous plafond sont les deux dimensions verticales suivantes (figure 9) :

- La hauteur H qui sépare le plateau de travail du plafond. L'espace délimité par ces deux éléments est un guide d'onde pour lequel la théorie géométrique est applicable lorsque $\lambda < H$, soit $f > c/H$.
- La hauteur h de la cloisonnette. La théorie géométrique considère la cloisonnette comme une simple arête diffractante, les effets basses fréquences à proximité de l'angle concave, réalisé par la cloisonnette et le plan de travail n'étant pas pris en compte. Dans ce contexte, la validité de la théorie géométrique commence lorsque $\lambda < h$, soit $f > c/h$.

Figure 9
Illustration des systèmes de transfert en présence d'un complexe bureau-plafond.



Pour mieux cerner les domaines de validité de l'approximation géométrique, le système du bureau sous plafond peut être séparé en deux sous-systèmes, le premier $S1$ correspondant à la propagation dans le guide d'onde, le second $S2$ à la diffraction par la cloisonnette. Ces deux systèmes transfèrent l'énergie de la source au récepteur au moyen de leurs fonctions de transfert respectives $TF1$ et $TF2$. $TF1$ dépend principalement de la hauteur H et de l'absorption par le plafond. Plus la hauteur est importante, moins l'énergie transmise l'est, idem pour l'absorption qui en augmentant, diminue l'énergie transmise. $TF2$, quant-à-elle dépend principalement de la hauteur h . Plus la hauteur est grande, plus l'énergie transmise est faible. Les deux sous-systèmes sont plus ou moins couplés selon la hauteur de la cloisonnette. Ainsi, pour un plafond absorbant, c'est le système $S2$ qui définit la limite de la théorie géométrique, soit $f > 1$ kHz pour une cloisonnette de hauteur 1,10 m ($h = 35$ cm). La figure 10 confirme ce résultat. Pour la même hauteur de cloisonnette, en présence d'un plafond, les deux systèmes apportent une part d'énergie au récepteur et la limite de la théorie se situe entre les deux fréquences caractéristiques du guide d'onde ($f = 195$ Hz, pour une hauteur de plafond de 2,50 m et un plan de travail à 75 cm du sol) et de la diffraction ($f = 1$ kHz). Plus le plafond est rigide, plus le système $S1$ l'emporte sur le système $S2$ et plus la fréquence limite s'approche de la fréquence caractéristique du système $S1$. Les figures 12 et 13 vont totalement dans le sens de ces interprétations. Enfin, lorsque la hauteur de la cloisonnette augmente, le poids du système $S2$ diminue encore et la limite de la théorie est celle du système $S2$, soit $f = 240$ Hz. A nouveau, les résultats de calcul confirment cette interprétation (figure 14). Plus la hauteur de la cloisonnette augmente, plus le couplage entre les deux systèmes est important. Ce couplage est pris en compte par l'acoustique géométrique mais, à nouveau, la théorie possède une limite fréquentielle inférieure construite cette fois-ci sur la hauteur $H - h$, soit $f = c/(H - h)$. Typiquement, pour une hauteur de cloisonnette de 1,50 m la fréquence critique est égale à 340 Hz.

Pour résumer, dans le cas d'un bureau double sous plafond, l'utilisation de la méthode géométrique profite favorablement d'une hauteur sous plafond et d'une hauteur de cloisonnette élevées. Typiquement, à 100 Hz (valeur minimale de l'octave 125 Hz) ces dimensions caractéristiques devraient être supérieures à 3,40 m, ce qui n'est jamais le cas en pratique. La première octave sera donc toujours difficile à modéliser. Pour l'octave 2, les hauteurs sous plafond sont compatibles avec les hypothèses. Un plafond rigide, qui favorise le système $S2$, sera en principe mieux modélisé qu'un

plafond totalement absorbant. Plus la hauteur de la cloisonnette s'élèvera, mieux le modèle se comportera. On voit déjà que pour une cloisonnette de 1,30 m et un plafond rigide, le modèle se comporte remarquablement bien (figure 14).

Figure 10

Théorie géométrique avec prise en compte de la diffraction par une cloisonnette : comparaison avec des mesures réalisées en chambre semi-anéchoïque en l'absence de plafond et pour une hauteur de cloisonnette de 1,10 m par rapport au sol (Repris de (Chevret, 2015)).

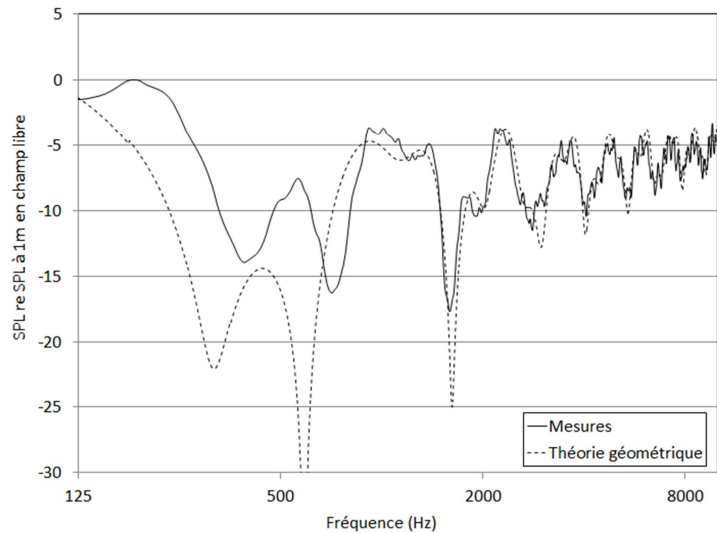


Figure 11

Comparaison entre un calcul basé sur une approche ondulatoire et des mesures en salle semi-anéchoïque pour une hauteur de cloisonnette de 1,10 m par rapport au sol (Repris de (Chevret, 2015)).

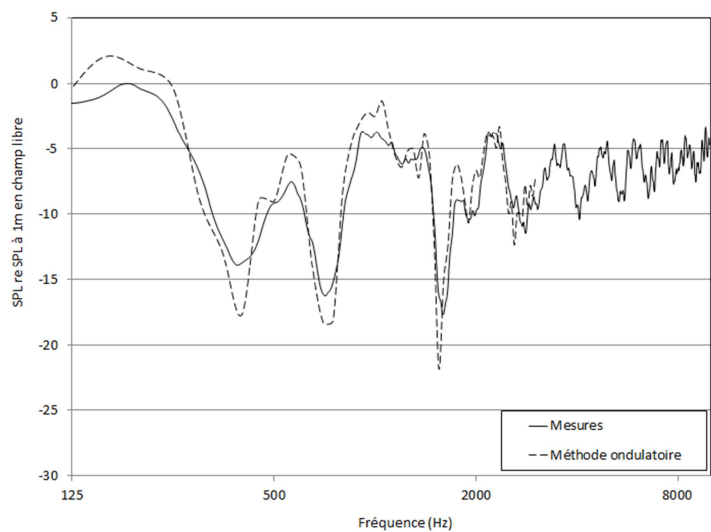


Figure 12

Comparaison entre calculs et mesures en salle semi-anéchoïque en présence d'un plafond semi-absorbant et d'une hauteur de cloisonnette de 1,10 m par rapport au sol (Repris de (Chevret, 2015)).

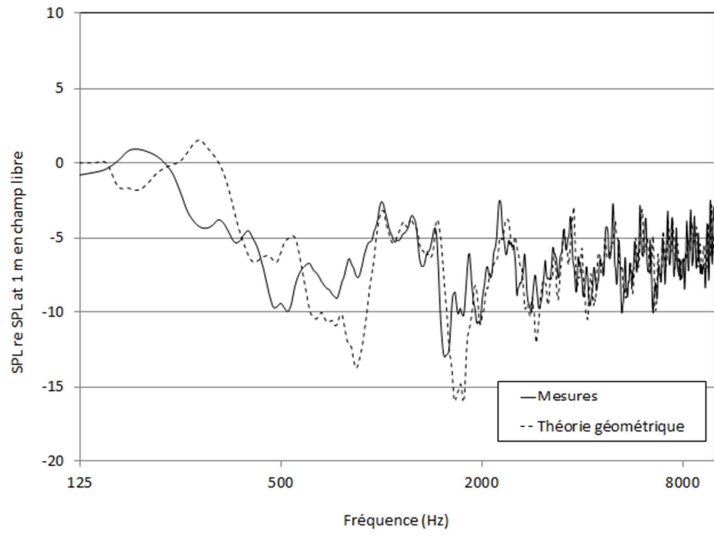


Figure 13

Comparaison entre calculs et mesures en salle semi-anéchoïque en présence d'un plafond rigide pour une hauteur de cloisonnette de 1,10 m par rapport au sol (résultats extraits du papier 2).

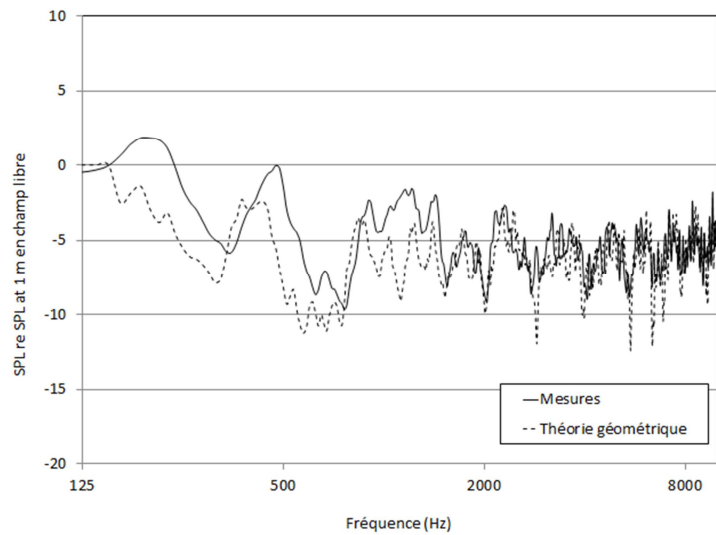
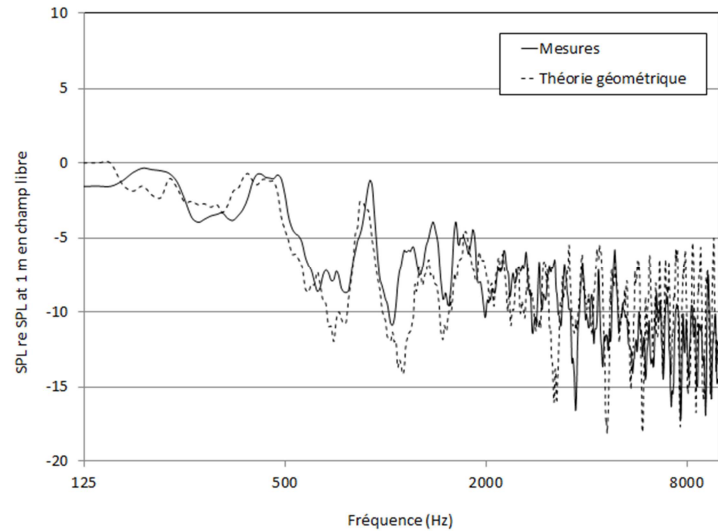


Figure 14

Comparaison entre calculs et mesures en salle semi-anéchoïque en présence d'un plafond rigide pour une hauteur de cloisonnette de 1,30 m par rapport au sol (Repris de (Chevret, 2015)).



Les figures 15 à 17 (Chevret, 2015) obtenues à partir de simulations utilisant le modèle géométrique donnent les contributions de chaque système au niveau du récepteur pour respectivement un plafond rigide, semi-rigide et partiellement absorbant en fonction de la hauteur de la cloisonnette. C'est par exemple à partir de ce type de résultats que le préventeur peut dimensionner le poste de travail.

Figure 15

Contributions des systèmes au niveau du récepteur pour un plafond rigide. S1 : propagation, S2 : diffraction, S3 : couplage

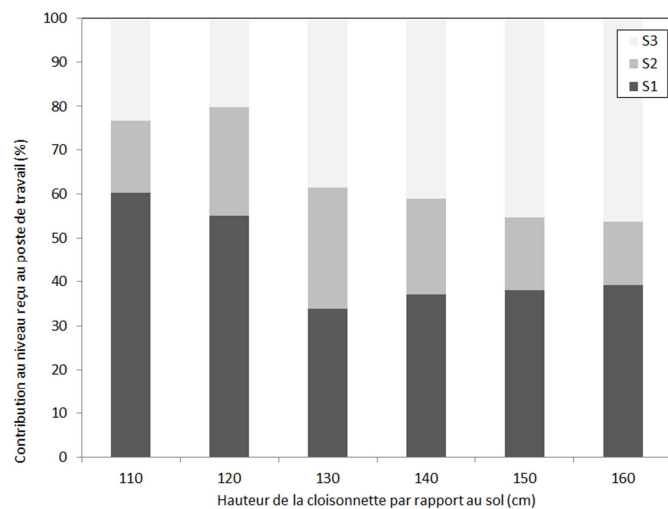


Figure 16

Contributions des systèmes au niveau du récepteur pour un plafond semi-absorbant. S1 : propagation, S2 : diffraction, S3 : couplage

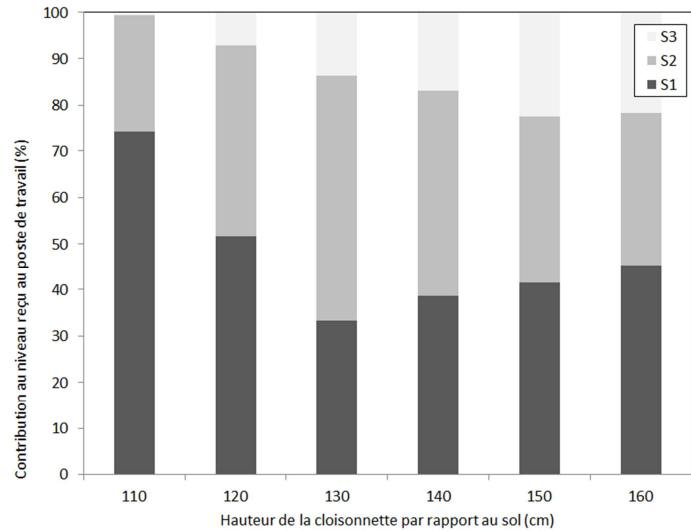
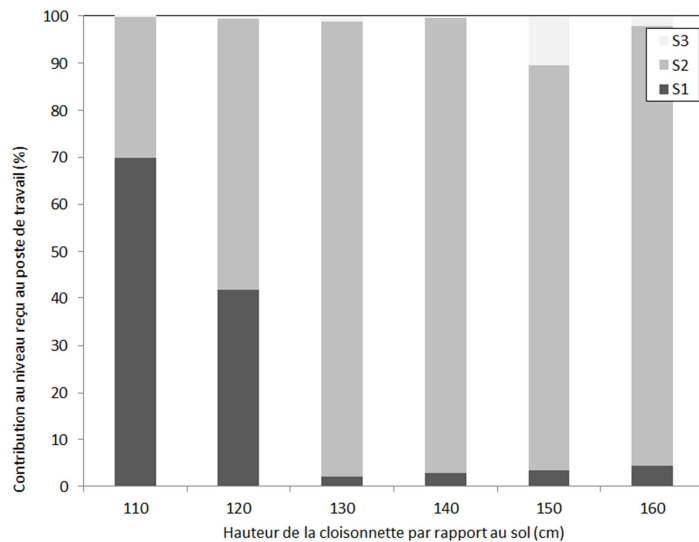


Figure 17 : Contributions des systèmes au niveau du récepteur pour un plafond très absorbant. S1 : propagation, S2 : diffraction, S3 : couplage



4. Détermination des « valeurs uniques »

La conception de lieux de travail performants du point de vue de l'acoustique nécessite la collaboration de bureaux d'études, d'architectes, d'aménageurs d'intérieurs, d'ergonomes, de préventeurs, de médecin du travail, etc. Le moyen le plus commode pour faire en sorte que l'ensemble de ces disciplines communiquent entre elles sans difficultés est de mettre au point des indicateurs simples, intuitifs, normalisés, ainsi que des valeurs à atteindre en fonction d'un degré d'exigence pour la qualité acoustique du local.

Le temps de réverbération par exemple, donne une idée de l'absorption acoustique d'un local, la décroissance spatiale fournit quant à elle une indication sur la propagation du son dans une direction privilégiée. Ces indicateurs sont en général basés sur l'expérience des acousticiens depuis des

décennies. Leurs plages de variations sont définies à partir de campagnes de mesures réalisées sur le terrain et dépendent du type de local et de l'activité à laquelle il est destiné.

Les principaux indicateurs recommandés dans les normes traitant des locaux de travail sans distinction sont la décroissance spatiale et le temps de réverbération. Les espaces ouverts ne dérogent pas à cette règle, même si les valeurs exigées sont spécifiques. Seulement, les travaux récents menés principalement par l'institut finlandais de santé au travail (FIOH) et par l'INRS montrent la nécessité de faire évoluer les grandeurs à mesurer. Pour calculer ces valeurs uniques, les modèles aussi doivent s'adapter aux contraintes de l'environnement comme la méconnaissance des propriétés des matériaux et la position des éléments du mobilier.

La détermination de valeurs uniques pour les open-spaces pose donc plusieurs questions : celle du choix des indicateurs, de la faisabilité de la mesure in situ et de la capacité des modèles à les calculer.

4.1. Niveau de pression par bande d'octave

Compte tenu des hypothèses faites sur le caractère aléatoire de la phase du champ acoustique, le MGE est parfaitement approprié pour calculer le niveau de pression dans une cellule de réception. Pour cela, il suffit de repartir de l'expression 1 et d'ajouter la part due à la diffraction, ce qui donne la relation (Chevret and Chatillon, 2012) :

$$\varepsilon(f) = \frac{\rho(f)}{n} \sum_{i=1}^m \ell_i \times \left(\prod_{j=1}^{p_i} (1 - \alpha_a(P_j, f) - \alpha_t(P_j, f)) \times \prod_{j=1}^{q_i} \alpha_t(P_j, f) \times \prod_{j=1}^{w_i} \alpha_d(P_j, f) \right) . \quad (6)$$

Cette relation est calculée par bande d'octave, f étant la fréquence centrale de la bande, en faisant l'hypothèse d'invariabilité des propriétés de l'environnement dans chaque octave.

α_d est le *coefficient énergétique de diffraction* d'une particule. Il s'écrit :

$$\alpha_d^k = |D^k|^2 \times \frac{r \times (r + s)}{s^2} \quad (7)$$

où D^k est le coefficient de diffraction pour la bande d'octave k .

Ainsi, l'énergie totale dans la cellule de réception pour la bande d'octave k s'écrit :

$$\varepsilon^k = \frac{\rho^k}{n} \sum_{i=1}^m \ell_i \times \left(\prod_{j=1}^{p_i} (1 - \alpha_a^k(P_j) - \alpha_t^k(P_j)) \times \prod_{j=1}^{q_i} \alpha_t^k(P_j) \times \prod_{j=1}^{w_i} \alpha_d^k(P_j) \right) , \quad (8)$$

où w_i représente le nombre de diffractions au cours du trajet de la particule.

Le niveau de pression en un point du local pour la bande d'octave k s'obtient donc en calculant l'expression :

$$L_p^k(r) = 10 \times \log_{10}(\mathcal{E}^k/\mathcal{E}_0) \quad (9)$$

Où \mathcal{E}_0 est l'énergie de référence en l'absence de perturbation acoustique.

4.2. Atténuation poste à poste

L'atténuation poste-à-poste est un indicateur qui vise à mesurer l'efficacité des aménagements entre les postes de travail notamment les cloisons séparatives de postes contigus. Elle est définie comme la différence entre le niveau de pression acoustique au poste considéré et le niveau de la source à 1 m en champ libre :

$$D^k(r) = L_p^k(r) - L_p^k(r_0), \quad r_0 = 1 \text{ m} \quad (10)$$

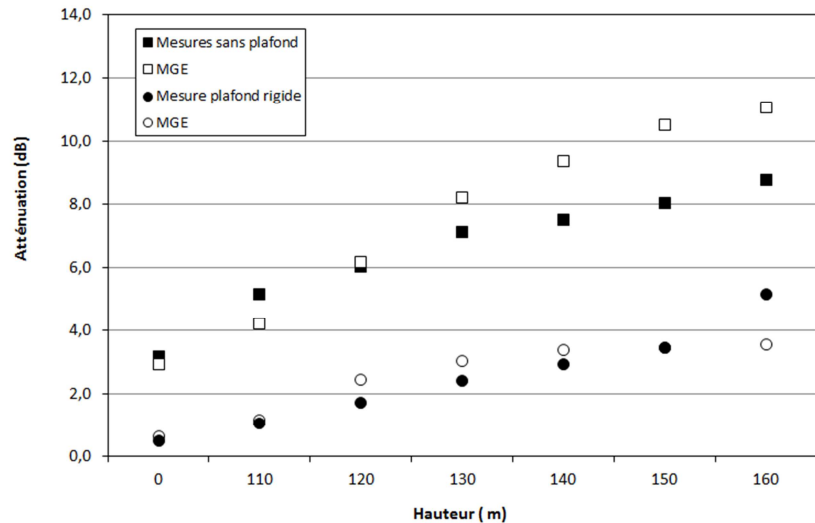
L'atténuation poste-à-poste est la première valeur cible retenue par la récente norme (NF-S31-199, 2016) spécifique aux bureaux ouverts. C'est en partie grâce aux mesures réalisées dans la chambre semi-anéchoïque de l'INRS que des valeurs de références ont pu être intégrées à la norme (tableau 1).

Hauteur d'écran séparateur en cm	Visibilité	Atténuation de poste à poste sans traitement absorbant (plafond plâtre) en dB	Atténuation de poste à poste avec un traitement en plafond avec Alpha w = 1 en dB
110	Satisfaisante pour 95 % de la population	1,1	3,6
120		1,7	4,5
130		2,4	5,4
140	Satisfaisante pour 5 % de la population	2,9	6,3
150	Inexistante	3,4	6,5

Tableau 1 : Extrait de la norme NF S 31-199, 2016 donnant les valeurs d'atténuation mesurées à l'aide de l'installation de la figure 8.

Les modélisations réalisées en parallèle avec le MGE confirment, à 2 dB près, les mesures en laboratoire. Les écarts les plus importants apparaissent pour les valeurs élevées de cloisonnettes en l'absence de plafond (cas extrême). Une analyse détaillée (Chevret and Chatillon, 2012) a montré que ces écarts sont à imputer en partie au modèle (effets basses fréquences) et aux mesures (directivité de la source).

Figure 18
Mesures et modélisation de l'atténuation poste-à-poste pour un bureau double en fonction de la hauteur de la cloisonnette. Configuration avec et sans plafond. Hauteur du plafond : 2,50 m.



4.3. Le taux de décroissance spatiale

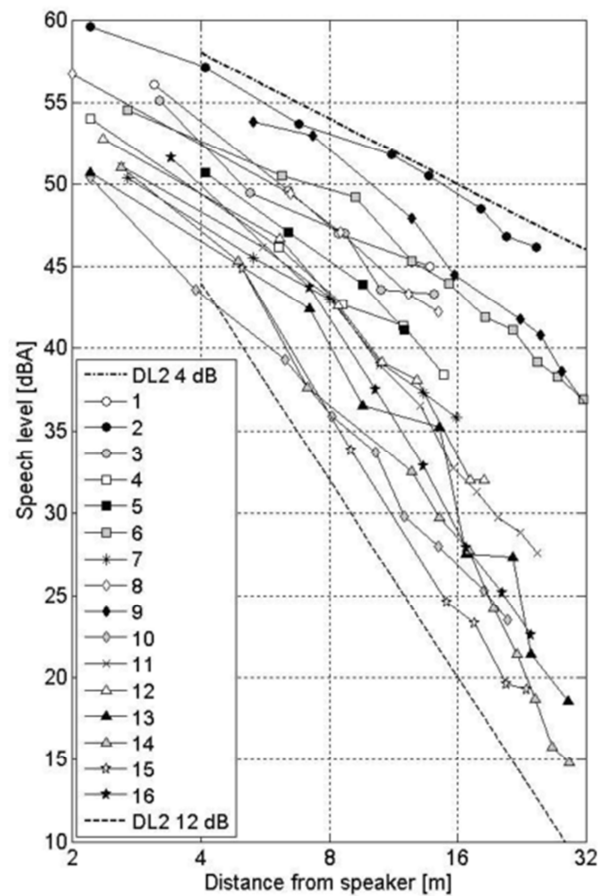
Le taux de décroissance spatiale permet de mesurer la diminution du niveau sonore par doublement de la distance d'éloignement à la source. Dans sa forme d'origine, l'indicateur, appelé DL_2 , a été développé pour évaluer la qualité acoustique des locaux de forme parallélépipédique lorsque l'une des dimensions est grande devant les autres, situation pour laquelle le temps de réverbération est sujet à discussion. La décroissance doit être évaluée en ligne droite pour un local vide, en l'absence de mobilier. La définition, ainsi que le protocole de mesure, sont fixés par la norme ISO-14257 (2002). Pour un local de travail, l'arrêté du 30 août 1990 en fixe les valeurs limites en fonction du volume et de l'encombrement. Le taux de décroissance doit être calculé à l'aide d'une méthode de moindres carrés à partir des valeurs de niveaux obtenues grâce à l'expression (9) en différents points d'une droite partant de la source. La valeur de la décroissance en champ libre est 6 dB. Dans un local vide, c'est théoriquement la valeur maximale atteignable puisque les réflexions sur les parois du local ainsi que sur les éléments de mobilier le cas échéant contribuent à un excès de niveau par rapport au champ libre.

Cet indicateur est utilisé depuis plusieurs décennies avec succès dans les grands locaux industriels. La norme (NF-S31-080, 2006) recommande également son utilisation dans les espaces de bureaux et fixe des valeurs à atteindre selon la qualité acoustique souhaitée pour différents types de bureaux. En particulier, elle préconise pour les bureaux ouverts des valeurs de 2, 3 et 4 dB(A) selon que la qualité du local est courante, performante ou très performante. Sur l'ensemble des mesures de décroissance réalisées par l'INRS en open-space depuis 2014, toutes sont supérieures à 3 dB(A) et 50% d'entre-elles sont supérieures à 4 dB(A). Ce résultat laisse à penser que l'acoustique des open-spaces est très majoritairement de bonne, voire, de très bonne qualité, ce qui est en contradiction avec la perception générale des individus qui travaillent sur les plateaux. Il y a plusieurs raisons à cette contradiction. La première, dont nous discutons dans cette section, est liée à l'indicateur lui-même.

En effet, parce qu'il doit être évalué dans des zones dégagées du local (les allées), loin des parois et du mobilier, le DL_2 renseigne principalement sur la qualité acoustique du plafond et du sol. Dans la mesure où l'on sait spécifier des plafonds et des moquettes ayant de très bonnes performances acoustiques sans avoir à passer par une mesure et que leur installation est relativement standard, l'utilité d'un tel indicateur est toute relative. C'est la raison pour laquelle (Virjonen et al., 2007) ont proposés deux modifications à l'indicateur : d'une part, le spectre de la source, qui est un bruit rose pour la DL_2 , a été remplacé par un spectre de parole. D'autre part, la ligne droite de mesure a été remplacée par une ligne brisée qui circule parmi les postes de travail. L'idée sous-jacente est de caractériser la perte d'intelligibilité entre un poste et l'ensemble du plateau. Virjonen et al. ont mené une large campagne de mesures à l'aide de ce nouvel indicateur dans 16 bureaux ouverts finlandais. Les courbes de décroissance obtenues (figure 19) possèdent, pour la plupart, une pente très supérieure (en valeur absolue) à celle que l'on obtient en champ libre, le taux de décroissance atteignant parfois des valeurs de l'ordre de 12 dB. Bien entendu, ces valeurs ne peuvent apparaître que lorsque les hauteurs de cloisons entre postes sont très élevées.

Cet indicateur de décroissance, nommé $D_{2,s}$, a fait l'objet d'une norme internationale récente spécifique aux open-spaces (ISO-3382-3, 2012). Dans cette norme, c'est la procédure de mesures et la méthode de calcul de l'indicateur qui sont exposées. Aucune valeur cible n'est recommandée, sans doute en raison d'un manque de données représentatives au niveau international.

Figure 19
Courbes de décroissance spatiale mesurées par (Virjonen et al., 2007) dans 16 bureaux ouverts finlandais.

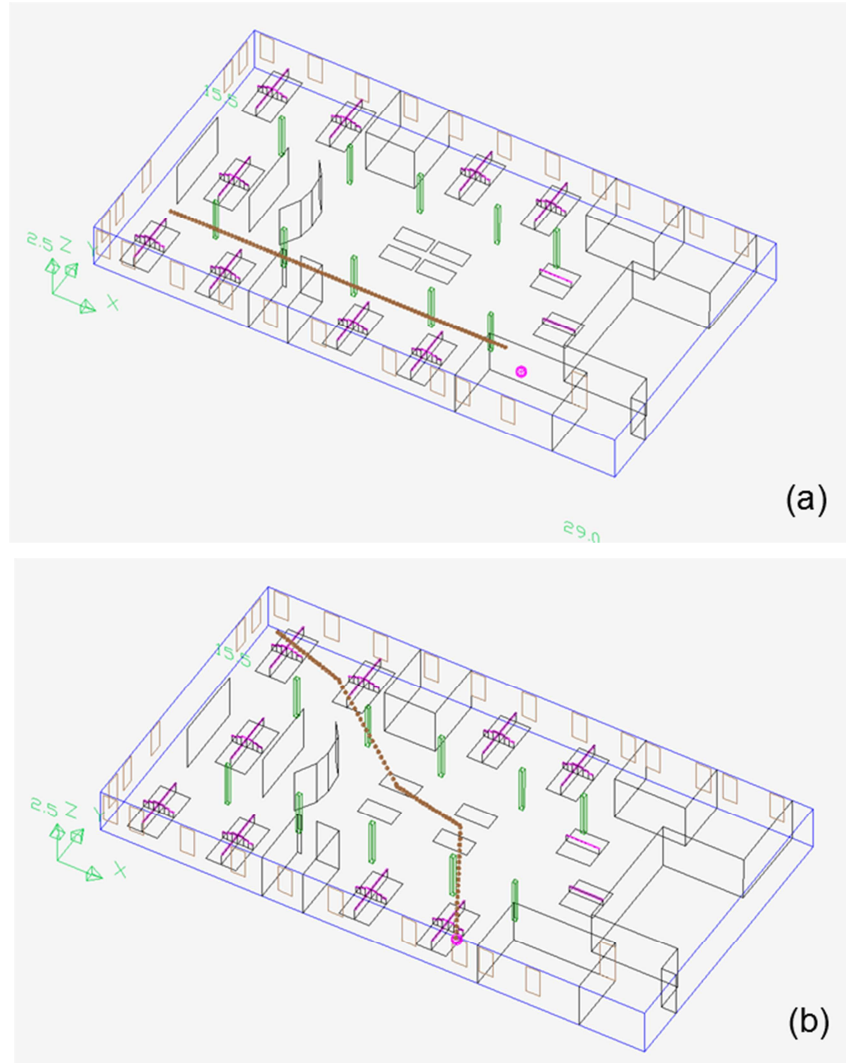


La nouvelle norme française (NF-S31-199, 2016) reprend l'indicateur et sur la base des travaux de l'INRS et du Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB) (Schmich-Yamane et al., 2014) fixe des valeurs en fonction du type de bureau.

Du point de vue de la simulation numérique, le calcul du taux de décroissance est parfaitement réalisable avec le MGE pour un espace de bureau de grandes dimensions. La figure 20 montre un exemple de lignes de décroissance pour un plateau de 1120 m^3 . Sur le schéma du haut, il s'agit d'une ligne droite comme l'exige la norme (NF-S31-080, 2006), sur celui du bas d'une ligne brisée conformément aux normes (ISO-3382-3, 2012) et (NF-S31-199, 2016). Les résultats des modélisations sont présentés sur les figures 21 et 22 pour les deux situations en comparaison avec des mesures réalisées sur site.

Figure 20

Lignes de décroissance linéaire ou brisée selon le choix de la norme (NF-S31-080, 2006) ou des normes (ISO-3382-3, 2012) et (NF-S31-199, 2016)



La DL_2 mesurée pour ce plateau est de l'ordre de 6 dB(A), ce qui indique que les performances acoustiques du plafond sont très bonnes. Le modèle donne une courbe de décroissance qui est cohérente avec les mesures. A noter que les temps de calcul sont de l'ordre de quelques minutes, donc tout à fait compatibles avec les exigences du terrain. La $D_{2,S}$, évaluée à partir de quatre points de mesure, donne une valeur de décroissance de 11 dB(A). Cependant, et c'est un point qui est clairement mis en évidence par le calcul, cette valeur est trompeuse puisque deux zones apparaissent en réalité sur la figure. La première contient uniquement les deux premiers points de mesure, pour laquelle la décroissance est de l'ordre de 5,5 dB(A), valeur qui est conforme à la DL_2 : dans cette zone, il n'y a pas de cloisonnette ; la seconde, centrée sur les 2 derniers points, pour laquelle la décroissance est de l'ordre de 15 dB(A) et dont le trajet passe par deux cloisonnettes.

En conclusion sur les indicateurs décroissance, plusieurs points forts sont à retenir. Tout d'abord, l'historique DL_2 peut être utilisée dans les open-spaces mais son champ d'application est très limité. Souvent, un simple regard au plafond permet de savoir si le traitement acoustique est suffisant. La

$D_{2,S}$ apporte incontestablement des informations intéressantes, notamment sur l'efficacité du couple (cloison/ plafond). Mais elle doit être utilisée uniquement sur des zones géographiques du plateau pour lesquelles l'aménagement est uniforme. Dans le cas contraire, elle peut conduire à une sous-évaluation de la gêne potentielle. Sur l'exemple précédent, considérer que la décroissance est de 11 dB(A), est extrêmement optimiste puisqu'au centre du plateau, là où il n'y a pas de cloisonnette, elle n'est que de la moitié. Dernier point important : la modélisation (rapide) est d'une grande utilité, voire indispensable pour l'interprétation des résultats de mesures. En l'occurrence, après un recalage du modèle par rapport aux mesures, la courbe de décroissance calculée permet de pointer les zones du local sur lesquelles il faudra intervenir.

Figure 21

Décroissances mesurées et modélisées pour l'open space illustré sur la figure 20(a). La valeur de décroissance obtenue dans ce cas est de 5,7 dB(A) contre 5,8 dB(A) pour la mesure.

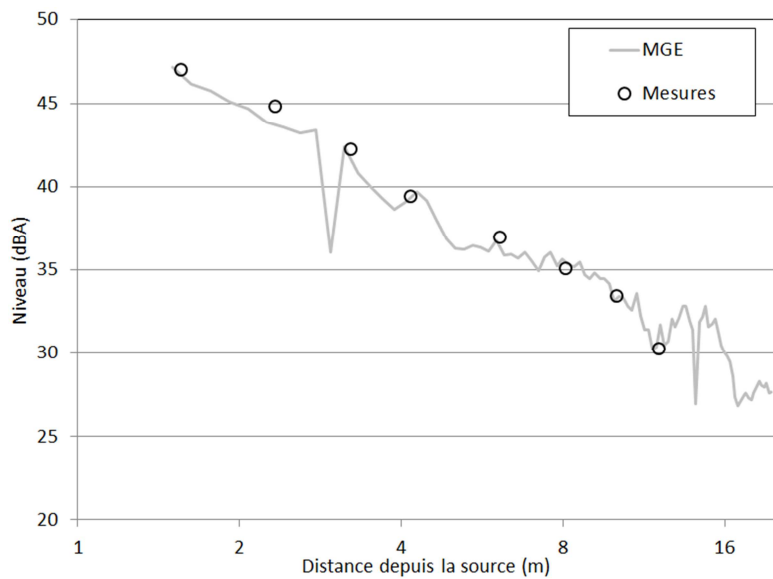
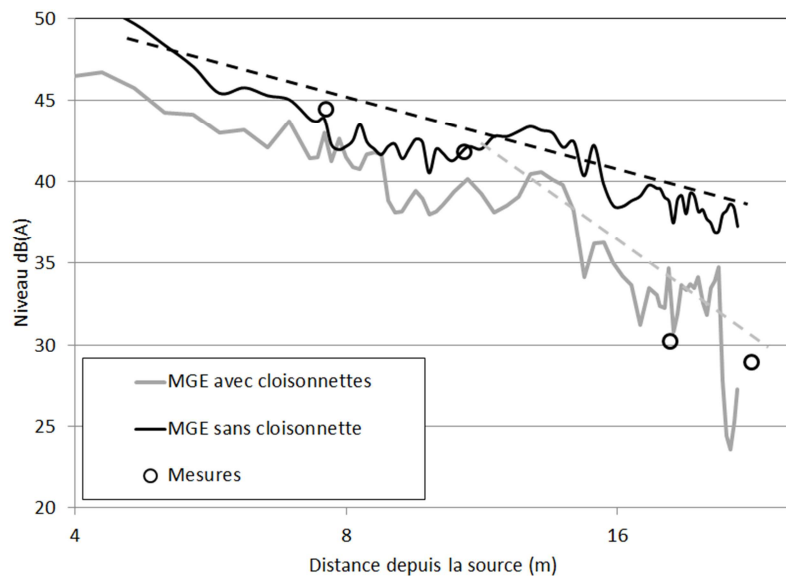


Figure 22

Décroissances $D_{2,S}$ modélisées et mesurées pour l'open space illustré sur la figure 20(b). La valeur de décroissance obtenue à partir des points de mesure est de 11 dB(A). La courbe en traits pointillés noirs représente la décroissance construite sur les deux premiers points de mesure, soit une $D_{2,S}$ de 5,5 dB(A). Celle en traits pointillés gris est la décroissance construite sur les deux derniers points de mesure, soit une $D_{2,S}$ égale à 15 dB(A).

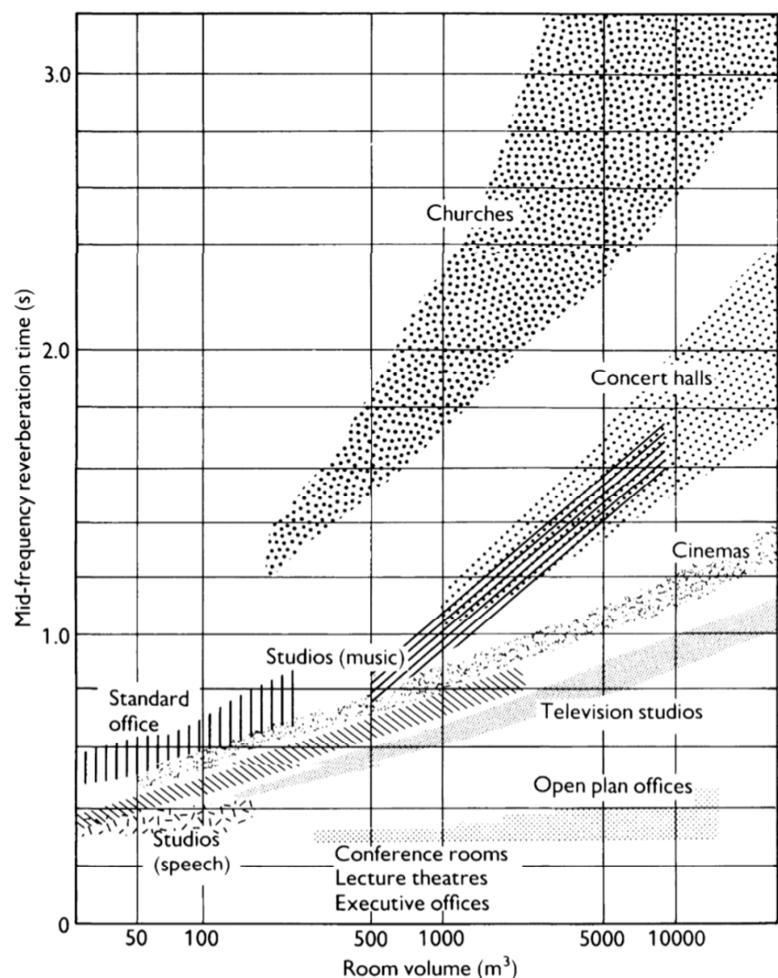


4.4. Le temps de réverbération

Le temps de réverbération est utilisé pour déterminer l'absorption acoustique globale d'un local. Il se calcule à l'aide de la courbe de décroissance temporelle de l'énergie acoustique et suppose implicitement que le champ acoustique est diffus dans le local. Selon la vocation de l'espace, le temps de réverbération idéal est différent. La figure 23 issue de (Fry, 2013) montre une large étendue de l'indice selon que l'on souhaite produire un effet de persistance sonore comme dans une église ou une salle de concert ou que l'on souhaite étouffer le son comme dans un studio d'enregistrement ou dans un espace de travail qui nécessite une certaine concentration.

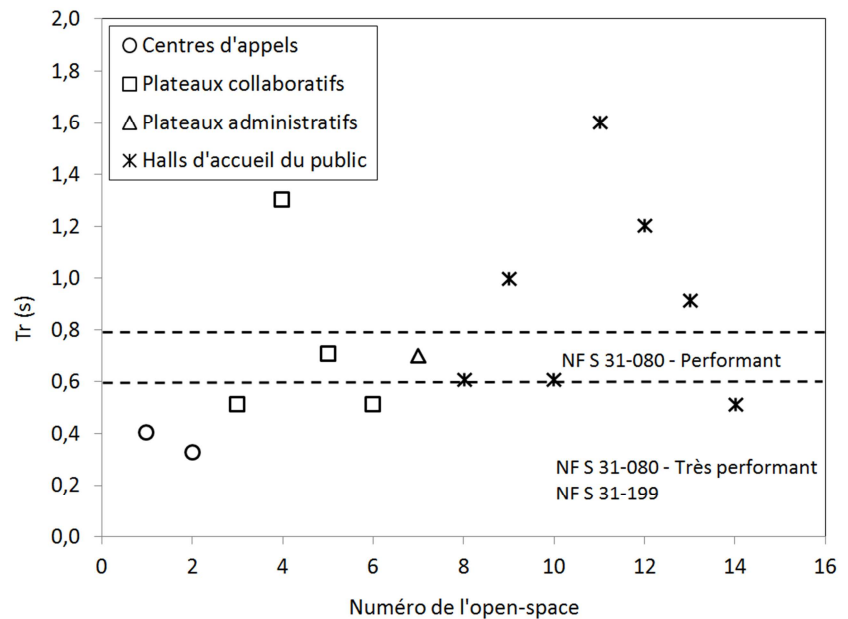
Figure 23

Plages d'évolution des temps de réverbération pour l'octave 500 Hz en fonction du volume du local et pour différents types d'espace. Tiré de (Fry, 2013)



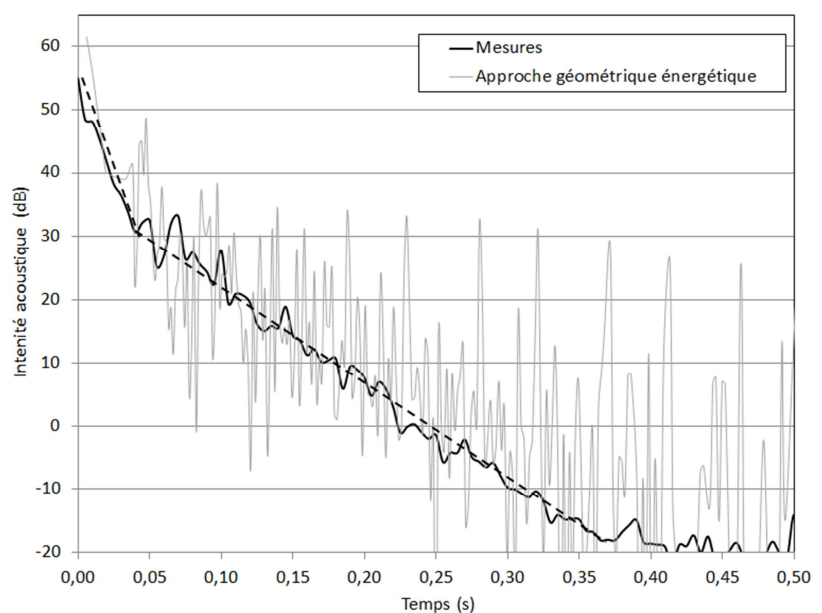
Les espaces de bureaux s'inscrivent en général dans cette dernière catégorie avec des valeurs de temps de réverbération qui se situent, d'après Fry 2013, entre 0,3 et 0,5 s (voir la catégorie « open plan offices » sur la figure 23). La plage des valeurs mesurées par l'INRS au cours de différentes interventions dans les bureaux ouverts (figure 24) est un peu plus large que cela. Dans 50 % des cas, elles sont inférieures ou égales à 0,6 s, ce qui correspond au niveau d'exigence de la norme (NF-S31-199, 2016), si l'on fait exception des halls d'accueil du public pour lesquels une tolérance est accordée jusqu'à un temps de réverbération de 1 s.

Figure 24
Plages d'évolution des temps de réverbération mesurés par l'INRS au cours d'intervention dans les bureaux ouverts



A noter que de son côté, la norme (ISO-14257, 2002; ISO-3382-3, 2012), dédiée spécialement à l'acoustique des bureaux ouverts ne fait pas du tout référence à cet indicateur, jugeant sans doute qu'il n'a pas de valeur ajoutée par rapport à l'indicateur de décroissance spatiale. Hormis le fait que la plage de variation du temps de réverbération dans un espace ouvert de bureaux est faible, sa mesure dans un local aménagé relève de la gageure. A titre d'exemple, les figures 25 et 26 montrent les courbes de décroissance temporelle énergétique EDT (Energy Decay Time) mesurée et calculée pour l'open-space schématisé sur la figure 20, qui nous a servi de support pour notre discussion sur la décroissance spatiale.

Figure 25
Courbe EDT en moyennes fréquences (octave 1000 Hz) pour l'open-space illustré sur la figure 20. La mesure est faite avec la méthode du bruit interrompu.



Les mesures montrent clairement une double pente, illustrée par les lignes pointillées, double pente qui est caractéristique du fait que l'une des dimensions du local (la hauteur en l'occurrence) est très différente des deux autres. Ainsi, pendant les 5 premières millisecondes, le champ acoustique est absorbé par le plafond, puis apparaissent les premières réflexions sur les murs. La première pente est donc représentative de l'absorption du plafond et la seconde de l'ensemble du local. Si l'on s'intéresse à l'absorption moyenne du local, c'est sur cette seconde pente qu'il faut donc se baser.

Le MGE permet, théoriquement, de calculer le temps de réverbération d'un local en partant de l'expression suivante :

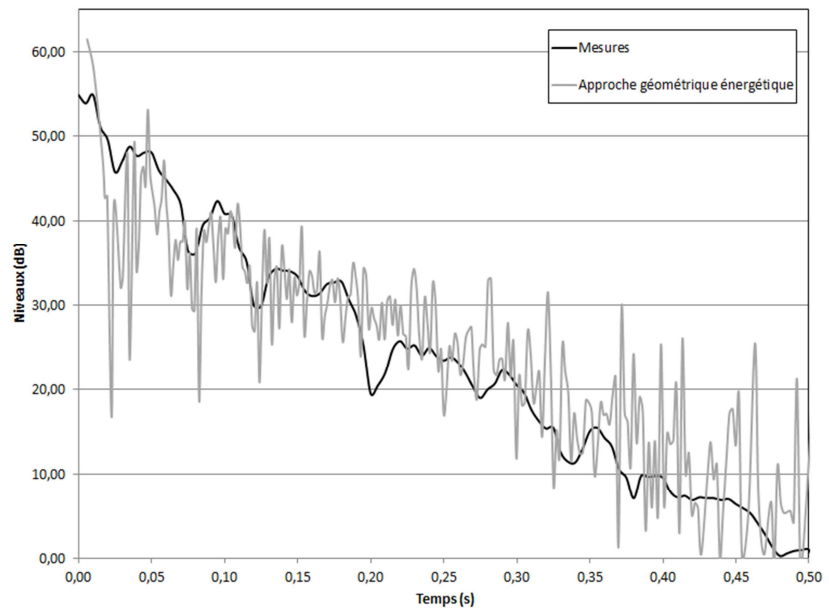
$$\varepsilon^k = \sum_{i=1}^m \varepsilon^k(r_i) = \sum_{i=1}^m \varepsilon^k(t_i) . \quad (11)$$

r_i est la distance parcourue par la particule entre la source et le récepteur et $\varepsilon^k(t_i)$ est l'énergie apportée par la particule qui arrive au temps t_i . La courbe EDT modélisée est obtenue en calculant :

$$\tilde{\varepsilon}^k(t) = \frac{1}{\Delta t} \int_t^{t+\Delta t} \varepsilon^k(t) dt . \quad (12)$$

Les courbes modélisées font apparaître des oscillations qui sont inhérentes à l'hypothèse d'indépendance des particules qui, en quelque sorte, crée de la discontinuité dans le champ acoustique (temps d'arrivée entre deux particules successives). Si l'on fait abstraction de ces oscillations, la décroissance obtenue par le modèle est voisine de celle mesurée. Les pics, très visibles en moyennes fréquences (figure 25), beaucoup moins en basses fréquences (figure 26), correspondent à des trajets moins atténués que d'autres, tels que ceux provenant des réflexions multiples sur les vitres du local, réflexions qui sont traitées de façon uniquement spéculaire par le logiciel.

Figure 26
Courbe EDT en basses fréquences (octave 125 Hz) pour l'open-space illustré sur la figure 20



Le calcul du temps de réverbération à partir de la courbe modélisée peut être réalisé par une méthode de moindres carrés entre des zones pertinentes de décroissance, toute la difficulté étant de fixer ces zones pertinentes. Un exemple d'estimation est présenté dans le tableau 2. A noter que les plages choisies dépendent de la fréquence de l'octave. L'écart le plus important entre le modèle et la mesure se situe à 125 Hz.

	125 Hz	1000 Hz	4000 Hz
Plage	[5 ms - 0,3 s]	[5 ms - 0,3 s]	[10 ms - 0,5 s]
Mesures	0,6	0,4	0,7
MGE	0,9	0,5	0,8
MGE plateau vide	2,1	0,4	1

Tableau 2 : Temps de réverbération estimés à partir des mesures et du calcul pour le plateau de la figure 20.

En conclusion, le temps de réverbération est un paramètre utile pour l'évaluation de la qualité acoustique d'un local industriel mais il est délicat à utiliser en bureaux ouverts car l'échelle de variation constatée est faible devant les incertitudes de l'estimation, que ce soit à partir des calculs ou des mesures. Ces incertitudes sont principalement liées à la définition de la plage d'estimation à partir de la courbe EDT (Energy Decay Time). L'amorce de la plage se situe après les premières réflexions. Elle dépend donc de l'aménagement dans la zone géographique proche de la source et du récepteur. Cependant, si ces précautions d'estimation sont prises, 0,6 s est la valeur cible à garder en tête pour tous les open-spaces, sauf les halls d'accueil du public pour lesquels une tolérance est accordée jusqu'à 1 s (NF-S31-199, 2016).

4.5. Conclusion

Du point de vue du préventeur en santé et sécurité au travail, l'acoustique des open-spaces est d'une grande complexité car elle doit intégrer le fait que l'espace de travail n'est pas simplement un local vide, qui pourrait être caractérisé par les outils habituels de l'acoustique des salles, mais un espace aménagé constitué d'une multitude de partitions, réalisées à l'aide d'un mobilier parfois hétéroclite. Les modèles numériques doivent s'adapter à ce contexte et, malgré leur limitation en basses fréquences, les méthodes géométriques énergétiques tirent parfaitement leur épingle du jeu. Le principal avantage étant leur performance de vitesse en comparaison de modèles plus précis mais absolument inutilisables pour des open-spaces de grandes dimensions. Les comparaisons réalisées entre le logiciel Rayplus de l'INRS, qui repose sur un MGE et des mesures en laboratoire et sur le terrain, ont toujours été dans la plage d'acceptabilité des utilisateurs. Cette plage est de l'ordre de 2 dB en laboratoire et dépend de la précision des données d'entrée sur le terrain.

Les acteurs de terrain ont besoin, quant à eux, de données synthétiques qui leur permettent d'évaluer simplement la qualité du local et de proposer des solutions d'aménagement. Les « valeurs uniques » qui se trouvent dans les normes ont été créées à cette fin. Mais là encore, les spécificités des open-spaces ont nécessité de faire un point sur la pertinence des indicateurs utilisés pour les locaux de travail en général. La conclusion est que la décroissance spatiale linéaire DL_2 et le temps de réverbération apportent assez peu d'information, si ce n'est sur le sol, le plafond ou l'absorption globale. Il y avait donc nécessité de mettre au point un indicateur qui renseigne sur des zones particulières de l'espace en y intégrant l'aménagement. Le travail réalisé par les chercheurs finlandais sur ce sujet est déterminant. Il a conduit à la mise au point du $D_{2,S}$ que l'on trouve aujourd'hui dans les deux normes de référence sur les open-spaces (ISO-3382-3, 2012) et (NF-S31-199, 2016). La première présente l'indicateur et la méthode de mesurage. La seconde donne des valeurs cibles pour différents types d'open-spaces. Ce sont notamment les travaux réalisés par l'INRS, en collaboration avec le CSTB qui ont servi à l'élaboration de ces valeurs cibles.

Références bibliographiques

- Benedetto, G. and R. Spagnolo (1985). "Reverberation time in enclosures: the surface reflection law and the dependence of the absorption coefficient on the angle of incidence." The Journal of the Acoustical Society of America **77**(4): 1447-1451.
- Chevret, P. (2015). "Advantages of the incoherent uniform theory of diffraction for acoustic calculations in open-plan offices." The Journal of the Acoustical Society of America **137**(1): 94-104.
- Chevret, P. and J. Chatillon (2012). "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 **132**(5): 3125-3137.

- Fry, A. (2013). Noise Control in Building Services: Sound Research Laboratories Ltd, Elsevier.
- ISO-3382-3 (2012). Acoustique -- Mesurage des paramètres acoustiques des salles -- Partie 3: Bureaux ouverts.
- ISO-14257 (2002). "Acoustique - Mesurage et description paramétrique des courbes de décroissance sonore spatiale dans les locaux de travail en vue de l'évaluation de leur performance acoustique ", Afnor.
- ISO-EN-354 (2003). Acoustics. Measurement of sound absorption in a reverberation room.
- Jean, P., I. Schmich-Yamane, J. Jagla and P. Chevret (2016). "The modelling of desk screens by a combined BEM–Source image approach." Applied Acoustics **101**: 91-97.
- Keller, J. B. (1962). "Geometrical Theory of Diffraction." JOSA **52**(2): 116-130.
- Kompella, M. S. and R. J. Bernhard (1993). Measurement of the statistical variation of structural-acoustic characteristics of automotive vehicles, SAE Technical Paper.
- Kouyoumjian, R. G. and P. H. Pathak (1974). "A uniform geometrical theory of diffraction for an edge in a perfectly conducting surface." Proceedings of the IEEE **62**(11): 1448-1461.
- Kuttruff, H. (2009). Room acoustics, CRC Press.
- McNamara, D., C. Pistorius and J. Malherbe (1990). "The Uniform Geometrical theory of diffraction." Artech House, London.
- NF-S31-080 (2006). Acoustique - Bureaux et espaces associés - Niveaux et critères de performances acoustiques par type d'espace.
- NF-S31-199 (2016). Acoustique - Performances acoustiques des espaces ouverts de bureaux
- Ondet, A. and J. Barbry (1989). "Modeling of sound propagation in fitted workshops using ray tracing." The Journal of the Acoustical Society of America **85**(2): 787-796.
- Schmich-Yamane, I., J. Jagla, P. Jean, P. Chevret and J. Chatillon (2014). Prediction of open plan office acoustics. Forum Acusticum, Krakow.
- Überall, H. (1992). Acoustic resonance scattering, CRC Press.
- Virjonen, P., J. Keränen, R. Helenius, J. Hakala and O. V. Hongisto (2007). "Speech Privacy Between Neighboring Workstations in an Open Office - A Laboratory Study." Acta Acustica united with Acustica **93**(5): 771-782.
- Wang, C. and J. Bradley (2002). "A mathematical model for a single screen barrier in open-plan offices." Applied Acoustics **63**(8): 849-866.

Chapitre 2

Les effets du bruit de parole sur les fonctions cognitives

L'open-space n'est pas un local de travail comme les autres en raison de ses dimensions et de son aménagement intérieur, nous l'avons vu dans le chapitre précédent. Mais ce qui le distingue avant tout, c'est l'activité exercée qui joue un rôle considérable dans la qualité de l'ambiance sonore. Les sources de bruit majoritaires dans un open-space sont les bruits de conversation. La principale gêne ressentie par les personnes provient des conversations intelligibles. La relation entre la gêne ressentie, ou plus généralement, la surcharge cognitive liée à la présence de bruit, est activement étudiée par les psychologues depuis les années 1990 au travers d'expériences en laboratoire. Les effets indésirables du bruit, dénommés ISE (Irrelevant Sound Effect), sont complexes : ils dépendent notamment du type de bruit et de la tâche que réalise le sujet. Ils font appel à des processus cognitifs

qui, au niveau de la mémoire de travail, en fonction du contenu du bruit et du type de tâche, peuvent se retrouver saturés et entraîner une diminution de la performance.

Une personne qui travaille dans un open-space fait très souvent appel à sa mémoire à court terme ou à sa mémoire de travail, la première visant à restituer le plus rapidement possible des informations enregistrées et la seconde à effectuer une manipulation préalable de l'information. Selon le mélange sonore dans lequel elle est plongée, sa capacité à réaliser sa tâche sera plus ou moins perturbée. Il est donc essentiel de comprendre les mécanismes psychologiques qui la conduisent à modifier consciemment ou inconsciemment sa stratégie de travail – ce peut être par une forme d'abandon ou au contraire un redoublement de l'effort pour maintenir un certain rendement – conduisant à de l'insatisfaction vis-à-vis du travail, un mal-être, une fatigue et pourquoi pas à un arrêt de travail.

L'objet de ce chapitre est de présenter les travaux les plus récents sur la mise en évidence de l'ISE lors de tests en laboratoire. Afin de bien saisir les enjeux engagés dans cette discussion, nous avons réservé une première partie du chapitre à la synthèse des informations sur l'ISE les plus utiles pour notre contexte. Nous verrons en particulier à quel point la connaissance des mécanismes d'interférences entre les processus cognitifs engagés au niveau de la mémoire, par exemple, est essentielle pour la mise au point des protocoles d'essais en laboratoire. Les travaux les plus récents sur l'ISE appliqués aux open-spaces semblent faire ressortir le consensus que plus le bruit (sous-entendu, de parole) est intelligible plus la gêne est avérée. Cependant, dans le détail, on note une grande dispersion des résultats ; les effets dépendant du type de tâche, du type de bruit et n'étant pas toujours significatifs. Autrement dit, même si certains auteurs, Valteri Hongisto en particulier, ont cherché à mettre au point un modèle de l'ISE basé sur un indicateur d'intelligibilité, beaucoup de travail de consolidation et de validation reste à faire. C'est ce qui est présenté dans la suite du chapitre. Après avoir rappelé les caractéristiques physiques qui déterminent l'intelligibilité d'un signal de parole et avoir présenté deux nouveaux indicateurs d'intelligibilité développés à l'INRS spécifiquement pour les open-spaces, nous conduirons une analyse critique sur la méthodologie qui a conduit à l'élaboration du modèle de l'ISE de Hongisto.

1. Effets indésirables du bruit (ISE)

Les personnes qui travaillent dans un espace ouvert se doivent de réaliser leurs tâches quotidiennes, qui demandent des ressources cognitives plus ou moins importantes, dans un environnement sonore non contrôlable. Le défi pour ces personnes est de rester concentrées sur leur objectif tout en ignorant l'information sonore inutile qui leur parvient; par exemple une discussion qui se tient à proximité de leur poste de travail. S'engage donc pour elles, au niveau de leur mémoire de travail, un processus qui consiste à leur permettre de rester focalisées sur leur tâche de travail et de trier les informations sonores (sériation et/ou focalisation attentionnelle) pour rejeter celles qui sont inutiles (inhibition et/ou sélectivité). C'est cette intensification de la focalisation et l'augmentation de sélectivité des informations, liée à la présence de bruit, qui est à l'origine des maux ressentis par les occupants des bureaux ouverts, tels que la perception d'un mal être, de fatigue, etc. La compréhension des

mécanismes d'interaction cognitifs est difficile et les psychologues ne s'entendent pas forcément sur le fonctionnement précis de la mémoire de travail dans ces circonstances. Tous, néanmoins, semblent s'accorder sur le fait que les défauts de sélectivité, ou l'intensification de la focalisation vont entraîner une surcharge cognitive, qui elle-même va entraîner des interférences entre la tâche à réaliser et le bruit à traiter. Certains considèrent qu'il s'agit de phénomènes « d'interférences par contenu » suggérant que c'est la ressemblance des éléments, une similarité phonologique, qui affaiblit le traitement sélectif et/ou inhibiteur de la mémoire de travail (Salame and Baddeley, 1982) et d'autres qu'il s'agit d'un phénomène d'interférence par processus, faisant l'hypothèse que la perturbation sonore et la tâche à réaliser partagent les mêmes processus de sériation (et/ou de focalisation). Les segments sonores qui arrivent dans un certain ordre à l'oreille des personnes, entrent en compétition avec le processus de sériation délibéré (et/ou focalisation), constitué par la tâche à réaliser, et le dégradent (Jones, 1993; Hughes and Jones, 2005). Dans ce dernier cadre d'hypothèse, les éléments sonores sont segmentables, constituent des flux différents, et c'est le degré de changement d'état de ces flux qui serait à l'origine de la dégradation, d'où le nom donné par (Jones et al., 1992) de « *changing state effect* ». Les essais réalisés en laboratoire semblent donner un avantage au modèle d'interférence par processus puisque la perturbation induite par des signaux sans parole sur une tâche de mémorisation de mots est similaire à celle induite par des signaux de parole (Jones 1993). Ces phénomènes d'interférence participent à la notion plus générale de distraction auditive dont (Hughes, 2014) dresse une description selon deux types : le premier type étant l'interférence par processus dont nous venons de parler et le second étant la capture attentionnelle qui correspond à un détournement de l'attention de la personne par un événement spécifique ayant un pouvoir attractif particulier. L'exemple choisi par l'auteur est l'appel de la personne par son prénom ou l'évocation du prénom de sa mère (effet cocktail party, (Cherry, 1953)). Cette forme de détournement d'attention est évidemment possible sur un plateau de bureaux, mais elle n'est pas abordée dans ce travail.

L'effet délétère induit par le changement d'état du flux sonore (selon le modèle d'interférence par processus) est appelé ISE pour Irrelevant Sound Effect. La plupart des expériences en laboratoire confirment les hypothèses de ce modèle. (Colle and Welsh, 1976; Tremblay and Jones, 1999; Schlittmeier et al., 2008) ont montré que le degré de perturbation est indépendant de l'intensité sonore de bruits stationnaires, au moins sur une plage de 48 à 76 dB(A). Mais, des effets ont été constatés pour des bruits variables correspondant à un discours narratif (Buchner, Irmen, & Erdfelder, 1996; Colle & Welsh, 1976; Salamé & Baddeley, 1986, 1987), une succession de consonnes (e.g., Jones, Madden, & Miles, 1992), de la musique contenant des passages rapides (e.g., Schlittmeier, Hellbrück, & Klatt, 2008a) et des séquences composées de sons de différentes tonalités (e.g., Jones & Macken, 1993). Pour les tâches de mémoire sérielle, le contenu sémantique du bruit ne semble pas avoir de conséquences sur l'ISE (Buchner, 1996), de même que pour certaines tâches plus complexes comme la répétition d'un texte ou du calcul arithmétique (Banbury and Berry, 1998). Ce n'est cependant pas le cas pour toutes les tâches, car même si les études se contredisent parfois, il semble que les tâches qui engagent des processus syntaxiques et sémantiques tels que l'écriture ou des tests de raisonnement grammatical semblent plus perturbées en présence de bruit de parole qu'en présence

de bruit sans parole (Sörqvist et al., 2012). Le sens dans le bruit ambiant semble être analysé sémantiquement de façon involontaire et activer ainsi les représentations cognitives de la mémoire sémantique entrant en conflit avec le processus sémantique volontaire que représente une tâche d'écriture, dans le cas où l'on souhaite évaluer la performance de rédaction d'un texte dans le bruit, par exemple (van de Poll et al., 2014). Ces phénomènes d'interférence spécifiques à la similarité des processus n'ont cependant pas pu être observés lors de nos essais en laboratoire (Ebissou, 2013). Notre recherche ne vise pas à étudier le fonctionnement de la mémoire à court terme et encore moins celui de la mémoire de travail. Les interférences par similarité de contenu sont très complexes et dépassent le cadre de ce travail. C'est pourquoi, la tâche de mémoire sérielle sera presque toujours utilisée lors de nos essais et nos résultats seront montrés en comparaison de ceux provenant de tests similaires, même si, nous le verrons, des différences existent dans les protocoles expérimentaux. Du coup, ce sont les variations du flux sonore (changing state hypothesis) qui focaliseront notre attention et en aucune manière le contenu sémantique. Pour quantifier ces variations, il faudra faire appel à des modèles physiques d'analyse des signaux comme ceux permettant d'aboutir aux indicateurs d'intelligibilité ou à la force de fluctuation. Nous présentons ces modèles dans la prochaine partie, puis leur application à l'évaluation de l'ISE.

2. Indicateurs pour évaluer l'intelligibilité en open-space

Les enquêtes de terrain révèlent que ce sont les conversations intelligibles qui sont les plus gênantes pour les occupants des open-spaces. Du point de vue des acousticiens, l'intelligibilité du signal de parole est en grande partie liée à son émergence énergétique par rapport au bruit de fond. Ceci est tout à fait compatible avec l'hypothèse de changement d'état de Jones. Partant de ce constat, les indicateurs d'intelligibilité, qui prennent en compte les variations du signal ou les émergences énergétiques, peuvent être de bons candidats pour l'évaluation de l'ISE.

Il y a, de façon schématique, deux moyens de caractériser l'intelligibilité d'un signal de parole à l'oreille d'un individu. La première consiste à modéliser la perte d'intelligibilité d'un signal parfaitement intelligible en lui affectant l'atténuation qu'il subit au cours de sa propagation depuis son origine. Ceci revient *in fine* à calculer « la réserve » d'audibilité du signal cible à l'oreille de l'auditeur. C'est ce que fait l'indice d'intelligibilité de la parole *SII* décrit dans la norme américaine (ANSI-S-3.5, 1997). Selon cette norme, une valeur unique d'intelligibilité peut être calculée à partir d'une sommation pondérée sur les bandes d'octave k de fonctions d'audibilité :

$$SII = \sum_{k=1}^n I_k A_k, \quad (13)$$

Où I_k est un facteur de pondération (ou facteur d'importance) qui dépend du type de message (contenu syntaxique, sémantique, linguistique) considérés. A_k est la fonction d'audibilité qui représente la réserve d'audibilité au niveau de l'oreille. Cette fonction dépend de l'ensemble les

facteurs qui sont susceptibles de dégrader l'intelligibilité tels que le masquage fréquentiel du signal cible, le seuil de perception de l'auditeur, la distorsion du signal cible selon la force de la voix, le niveau de bruit ambiant, la distance de séparation entre le locuteur et l'auditeur, les pertes auditives éventuelles de l'auditeur, etc. D'une façon générale, la fonction d'audibilité s'écrit (en l'absence de phénomènes de distorsion) :

$$A_k = \frac{L_{p,E}^k - L_{B,E}^k + 15}{30} \quad . \quad (14)$$

Où $L_{p,E}^k$ est le niveau du signal cible à l'oreille de l'auditeur et $L_{B,E}^k$ est le niveau de bruit de la perturbation à l'oreille ; la différence des deux grandeurs correspondant au rapport signal sur bruit à l'oreille de l'auditeur. Le fait de translater par 15 et de normaliser par 30 permet simplement de centrer la fonction autour d'un rapport signal sur bruit de 0 dB et de faire varier l'indice de +0,1 par pas de + 3 dB. De ce fait, l'intelligibilité est nulle lorsque le rapport signal sur bruit est égal à -15 dB et parfaite lorsqu'il est égal à 15 dB.

La seconde approche est en tout point compatible avec l'approche précédente à la différence qu'elle étudie la variation du signal, au lieu de l'atténuation globale. Pour ce faire, elle s'appuie sur la perte de modulation de l'enveloppe du signal cible en conjecturant que la perte d'intelligibilité est nulle lorsque la variation de modulation est nulle et qu'elle est totale lorsque la variation de modulation est égale à 1. De ce fait, un signal totalement intelligible (modulation égale à 1) à la source reste totalement intelligible au niveau du récepteur lorsque la perte de modulation est nulle. Il devient inintelligible lorsque cette perte de modulation vaut 1. Cette description singulière permet donc de traduire de façon simple les effets du système de transmission (le local en l'occurrence) sur un signal initialement totalement intelligible. Cette approche a été développée par (Steeneken and Houtgast, 1980) puis déclinée dans la norme (IEC 60268-16, 2011). L'indicateur caractérisant l'intelligibilité au sens de la modulation du signal cible est le *STI*. Son expression générale est très similaire à celle du *SII* :

$$STI = \sum_{k=1}^n W_k TI_k \quad , \quad (15)$$

Où W_k est un facteur de pondération par bande et TI_k est l'indice de transmission traduisant la qualité de la transmission de la modulation du signal cible. Cette modulation est analysée sur 14 bandes de tiers d'octave, allant de 0,63 Hz à 12,5 Hz, TI_k étant la moyenne des transmissions de modulation sur toutes ces bandes. L'analogie avec le *SII* est immédiate puisque l'indice de transmission par bande d'octave pour chaque fréquence de modulation s'écrit :

$$TI_{k,i} = \frac{SNR_{k,i}^{app} + 15}{30} \quad (16)$$

Dans cette expression, $SNR_{k,i}^{app}$ est le rapport signal sur bruit, dit apparent, entre le signal cible et le bruit perturbateur à l'oreille de l'auditeur. Il dépend directement de la fonction de transfert de modulation $m_{k,i}$:

$$SNR_{k,i}^{app} = 10 \times \log_{10} \left(\frac{m_{k,i}}{1 - m_{k,i}} \right) \quad (17)$$

Cette dernière contient implicitement tous les facteurs qui contribuent à la réduction de modulation du signal de parole. Dans le cas où le signal est dégradé à la fois par la présence de bruit ambiant et de réverbération dans le local et par des effets de masquage fréquentiel, la fonction de transfert de modulation s'écrit comme le produit de trois fonctions de transfert de modulation partielle :

$$m_{k,i} = m_k^1 \times m_k^2 \times m_{k,i}^3 \quad (18)$$

Avec m_k^1 , la fonction de transfert de modulation induite par la présence de bruit ambiant,

$$m_k^1 = \frac{1}{1 + 10^{-SNR_k/10}} \quad (19)$$

m_k^2 , la fonction de transfert de modulation induite par le masquage fréquentiel et le seuil de l'audition, soit :

$$m_k^2 = \frac{I_k}{I_k + I_{rs,k} + I_{a,k}} \quad (20)$$

$I_{rs,k}$ est l'intensité du seuil d'audition et $I_{a,k}$ est l'intensité de masquage d'une bande d'octave sur sa voisine supérieure.

Et, $m_{k,i}^3$ est la fonction de transfert de modulation due à l'ensemble des réflexions dans le local. Cette fonction peut s'écrire soit à l'aide de la réponse impulsionnelle de la salle $h_k(t)$ par bande d'octave, selon l'expression :

$$m_{k,i}^3 = \frac{\left| \int_0^\infty h_k^2(t) \exp(-2i\pi F_i t) dt \right|}{\left| \int_0^\infty h_k^2(t) dt \right|} \quad , \quad (21)$$

Soit, sous une forme simplifiée ne tenant compte que de la partie du champ réverbéré, selon l'expression :

$$m_{k,i}^3 = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{2\pi F_i T_r^k}{13,8}\right)^2}} \quad (22)$$

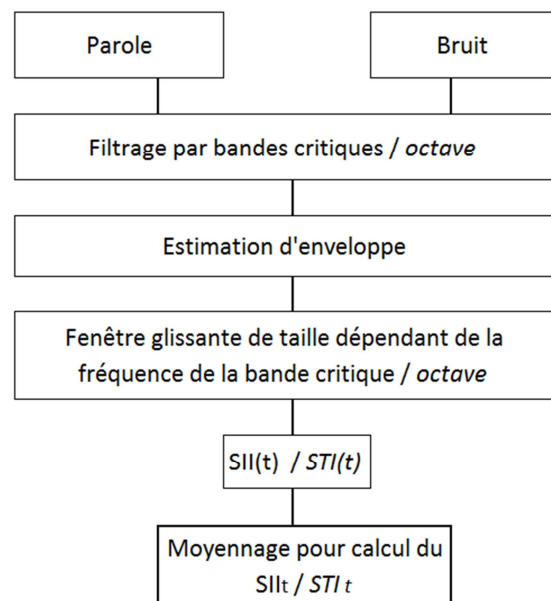
Où F_i est la valeur de la fréquence de modulation pour la bande tiers d'octave i comprise entre 0,63 Hz et 12,5 Hz et T_r^k est la valeur du temps de réverbération pour l'octave k .

En résumé, si ce n'est certains facteurs de pondération spécifiques pour le masquage fréquentiel, le type de voix considérée, le type de message de parole, les deux approches (SII / STI) sont très similaires. Cependant, il faut reconnaître que l'introduction de la fonction de transfert de modulation dans les modèles d'intelligibilité est très avantageuse puisqu'elle permet d'établir un lien explicite entre l'intelligibilité et le milieu de propagation (au travers du temps de réverbération par exemple).

Il convient néanmoins de souligner que ces indicateurs ont été établis pour des conditions d'environnement stationnaires. Or, dans un bureau ouvert, le niveau de bruit ambiant ne l'est pas puisqu'il est sensible au nombre de personnes présentes et à l'activité exercée par ces personnes. Pour tenir compte de ces variations, deux extensions de ces approches ont été envisagées dans les travaux les plus récents. La première consiste à calculer un indice d'intelligibilité glissant moyenné sur la totalité du signal (voir SII_t sur la figure 27). Cette idée a été exploitée en premier par (Rhebergen and Versfeld, 2005) en s'appuyant sur les développements du SII (Equation 13). Grâce à cette formulation, ils ont pu retrouver des valeurs de seuil de réception de la parole conformes à ceux mesurés en laboratoire par des tests d'intelligibilité (Rhebergen et al., 2006). Dans le même esprit, Brocolini et al. (2015) ont développé un indicateur glissant moyenné similaire à celui de Rhebergen mais basé sur les principes de calcul du STI . Cet indicateur a été utilisé pour la mesure du décrement de la performance et de la gêne lors de la réalisation d'une tâche de mémoire sérielle, en présence d'un bruit ambiant constitué de signaux de parole, donc fluctuant. Nous reparlerons de ce point précis dans la prochaine partie du document.

Figure 27

Principe de calcul des indices d'intelligibilité en présence de bruit ambiant fluctuant. Analyse glissante sur le signal : *SII* selon (Rhebergen and Versfeld, 2005) et *STI* selon (Brocolini et al., 2016) (en italique dans le schéma)



L'approche par fenêtre glissante sur le signal est intuitive car elle constitue une simple extension des approches stationnaires utilisées pour le calcul des *SII* et *STI*. Elle pose néanmoins deux problèmes. Le premier est d'ordre théorique, lié au choix de la durée de la fenêtre d'analyse. Cette durée doit tenir compte a priori de la réponse temporelle du système auditif (Moore, 1997). C'est une question qui est encore débattue dans les publications les plus récentes (voir la discussion de (Rhebergen, Versfeld et al., 2006)). Le second problème est d'ordre pratique et relève de la philosophie même de la méthode qui repose sur l'utilisation de signaux temporels. Comme il s'agit d'une analyse fine, à l'échelle de quelques millisecondes, elle est performante pour un échantillon de signal donné, ce qui est très utile pour des tests en laboratoire mais trop restrictif dans des ambiances réelles pour lesquelles on souhaite réduire le nombre de paramètres d'entrée à quelques données physiques tels que des éléments sur l'aménagement et l'occupation du local. C'est ainsi qu'a été développé à l'INRS (Chevret, 2016) une approche complémentaire basée sur l'idée que les modulations du bruit ambiant sont en lien direct avec ces paramètres. Ainsi, la donnée d'entrée n'est pas un signal particulier de bruit ambiant mais un taux de modulation du bruit ambiant, représentant d'une famille de signaux ou mieux, un type de local. Pour cela, nous sommes repartis de la formulation (17) du *STI* basé sur les fonctions de transfert de modulation en remplaçant la fonction m_k^1 par une fonction $m'_{k,i}^1$ qui tient compte de la modulation du bruit ambiant à la fréquence F_i . Par transposition de la relation (17), $m'_{k,i}^1$ s'écrit en fonction d'un rapport signal sur bruit équivalent $SNR'_{k,i}$:

$$m'_{k,i}^1 = \frac{1}{1 + 10^{-SNR'_{k,i}/10}} \quad (23)$$

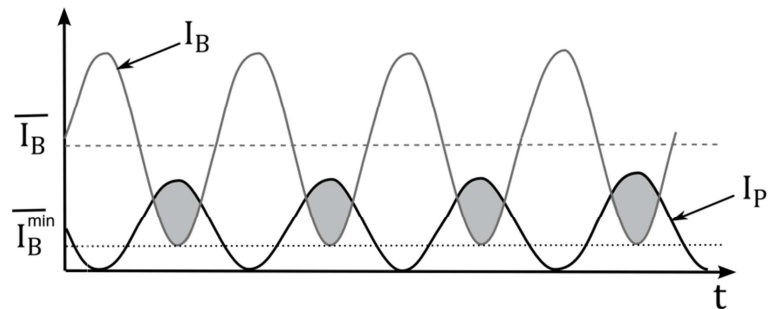
Pour estimer le rapport signal sur bruit équivalent, l'effet de masquage sur le signal est minimisé en prenant comme intensité de masquage la valeur minimale de l'enveloppe du signal de bruit ambiant, comme illustré sur la figure 28. Cette hypothèse permet d'écrire :

$$SNR'_{k,i} = SNR_k - 10 \times \log(1 - m_N(F_i)) , \quad (24)$$

Où $m_N(F_i)$ est la modulation du bruit ambiant à la fréquence F_i . La modulation du bruit ambiant agit donc comme un démasquage sur le signal de parole.

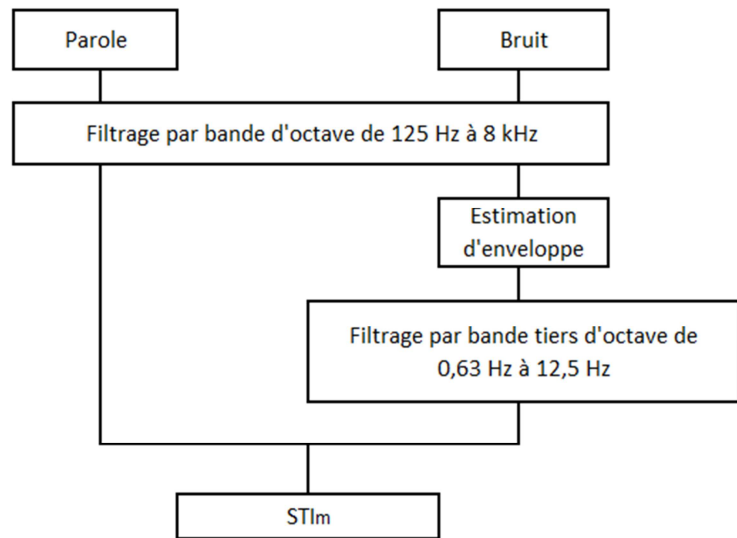
Figure 28

Illustration du masquage d'un signal de parole par un bruit ambiant modulé (Chevret, 2016). I_p et I_B représentent respectivement l'enveloppe d'un signal de parole de modulation égale à 1 et celle du bruit. \bar{I}_B est l'intensité moyenne du bruit. \bar{I}_B^{\min} est la valeur d'intensité prise pour le calcul du rapport signal sur bruit et correspondant à la valeur minimale de l'enveloppe du signal de bruit. Les zones grisées montrent les parties intelligibles du signal cible (écoute dans les trous).



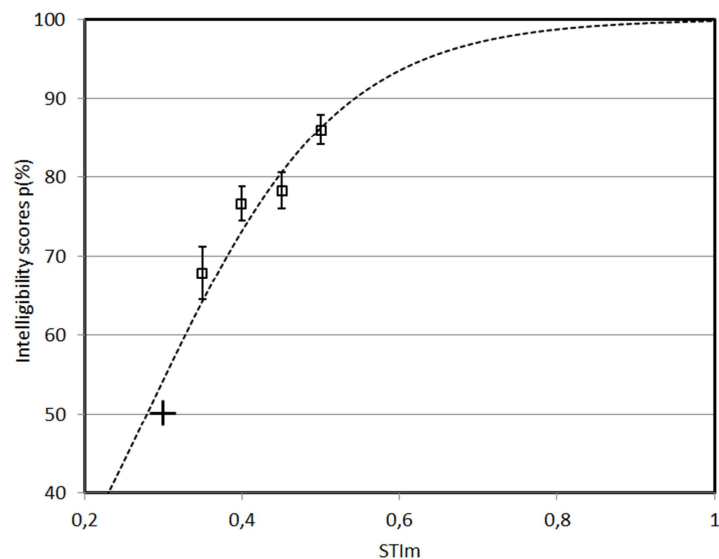
La figure 29 illustre le principe de calcul de cet indicateur d'intelligibilité, nommé STI_m . Dans cette nouvelle approche, la donnée d'entrée peut être, de façon similaire au calcul des SII_t et STI_t , des signaux temporels pour le signal de parole et le bruit ambiant, ou alors un spectre par bande d'octave pour le bruit de parole ou un spectre de modulation par bande tiers d'octave pour chaque bande d'octave pour le bruit ambiant. Cet indicateur est donc, par définition, beaucoup plus polyvalent que les indicateurs glissants.

Figure 29
Principe de calcul du STI_m
(Chevret, 2016)



Des tests au seuil de détection de la parole (SRT pour Speech Reception Threshold) et d'intelligibilité réalisés en laboratoire à l'INRS sur une population de 61 sujets ont effectivement montré un effet de démasquage significatif par la modulation du bruit ambiant et donc une augmentation de l'intelligibilité elle-aussi significative (Chevret, 2016). La figure 30 illustre ce propos et montre que le STI_m est un bon descripteur de l'intelligibilité dans un bruit ambiant fluctuant, puisque pour un même STI de 0,3 (sous-entendu stationnaire), les scores d'intelligibilité augmentent significativement lorsque le STI_m augmente. La fonction logistique qui relie l'indicateur avec le score d'intelligibilité, est présentée en pointillé sur la figure 30. La régression, obtenue sur l'inverse de la fonction logistique, décrit la variation du score d'intelligibilité avec un coefficient de détermination égal à 0,94.

Figure 30
Scores d'intelligibilité en fonction du STI_m . Tests réalisés en laboratoire à l'INRS sur un panel de 61 sujets. Pour ces tests, le STI stationnaire est constant et égal à 0,3 (Chevret, 2016).



L'application directe de cette relation logistique à des valeurs de STI_m mesurées dans 9 bureaux ouverts pendant plusieurs heures a permis une classification des bureaux du point de vue de

l'intelligibilité de l'ambiance sonore. Cette classification, présentée dans le tableau 3 montre très clairement une différence mesurable entre le plateau 1 et le plateau 9. Il existe même des groupes d'espace qui sont statistiquement séparables d'autres groupes. Par exemple, le groupe contenant les bureaux 2 et 3 sont les seuls à être identifiés par la lettre A, après application d'analyse post-hoc de Tukey. Il est donc statistiquement différencié du groupe (5,6,7,8,9) et plus clairement encore du groupe (7,8). En conclusion de cette analyse de terrain, il semble que la modulation du bruit ambiant pourrait être utilisée pour évaluer le degré d'intelligibilité d'un open-space et donc, sa propension à générer de la gêne auprès des salariés.

N°	STI_m	Score d'intelligibilité p (%)	Groupes à partir d'une analyse de Tukey
1	0.36	65	
2	0.37	69	A
3	0.38	70	AB
4	0.39	72	BC
5	0.40	72	CD
6	0.40	72	CD
7	0.41	75	DE
8	0.43	77	E
9	0.48	84	

Tableau 3 : Hiérarchisation de 9 bureaux ouverts en fonction de la valeur du STI_m . Estimation à partir d'un SNR de -6 dB équivalent à un STI stationnaire de 0,3 ($p = 50\%$, i.e. SRT). (Chevret, 2016)

Dans cette même dynamique de recherche d'un indicateur d'émergence de la parole, (Schlittmeier et al., 2012) ont utilisé un indice psychoacoustique, la force de fluctuation, développé à l'origine par (Zwicker and Fastl, 1990) puis repris par (Aures, 1985) et (Daniel and Weber, 1997). On retrouve aujourd'hui cet indice, implémenté de différentes manières, dans les logiciels de psychoacoustique du commerce. La force de fluctuation vise à décrire la modulation de l'intensité sonore d'un signal autour de la fréquence de 4 Hz, fréquence correspondant au débit syllabique moyen d'un discours sans contrainte. La force de fluctuation s'exprime comme :

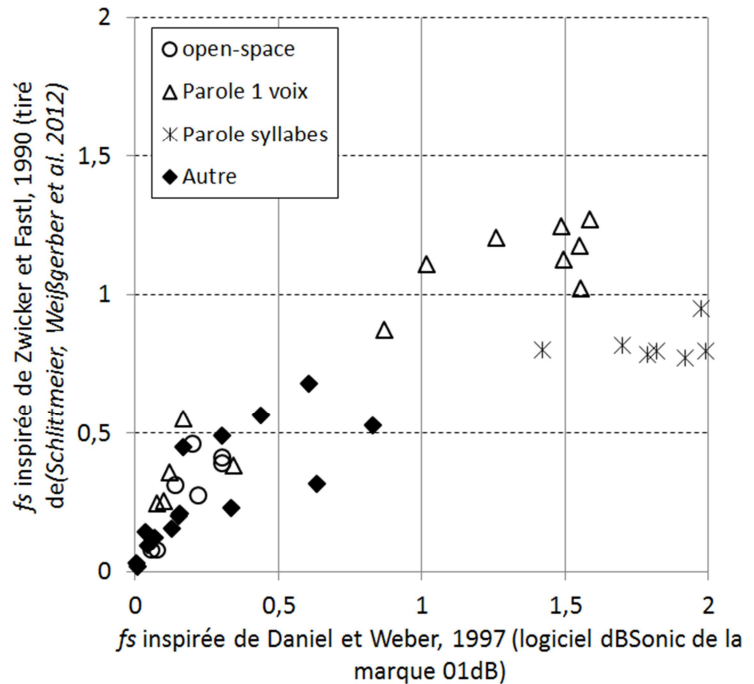
$$f_s = \frac{\int_0^{24 \text{ Barks}} \Delta L(z) dz}{\frac{4 \text{ Hz}}{f_{mod}} + \frac{f_{mod}}{4 \text{ Hz}}} \quad [\text{vacils}] \quad (25)$$

Où ΔL est la profondeur de modulation correspondant à la modulation perçue et f_{mod} est la fréquence de modulation. Ainsi, la force de fluctuation est maximale à 4 Hz. Globalement, l'indicateur est réputé donner une bonne idée de la modulation des signaux synthétiques, mais il semble plus limité pour des signaux réels. Une seconde critique est qu'il n'existe aucune expression acceptée par la communauté scientifique pour le calcul de la profondeur de modulation. C'est ainsi que l'on peut obtenir des valeurs

assez différentes de la force de fluctuation selon que l'on utilise le modèle de (Zwicker and Fastl, 1990) ou de (Daniel and Weber, 1997). A titre d'exemple, la figure 31 montre les valeurs de force de fluctuation calculées à l'aide des deux modèles pour le jeu de signaux choisi par (Schlittmeier et al., 2012), allant de la répétition de sons syllabiques à la superpositions de bruit de paroles en passant par des morceaux de musique plus ou moins rythmées ou des cris d'animaux. La corrélation entre les deux versions de l'indicateur est relativement bonne (de l'ordre de 0,75 pour une régression linéaire), mais il est certains cas où le rapport est supérieur à 2, notamment pour les paroles monosyllabiques.

Figure 31

Forces de fluctuation calculées à partir des modèles de (Zwicker and Fastl, 1990) et de (Daniel and Weber, 1997) pour les signaux utilisés dans l'étude (Schlittmeier et al., 2012).



Malgré ces limitations, la force de fluctuation présente un avantage sur les indicateurs d'intelligibilité : c'est celui de pouvoir utiliser directement le mélange constitué du signal cible et des bruits masquants alors que pour ces derniers, la séparation des deux composantes est indispensable pour construire le rapport signal sur bruit. En fait, la force de fluctuation vise davantage à déterminer le taux d'intelligibilité d'un mélange sonore plutôt que l'intelligibilité d'un signal cible dans le bruit de fond.

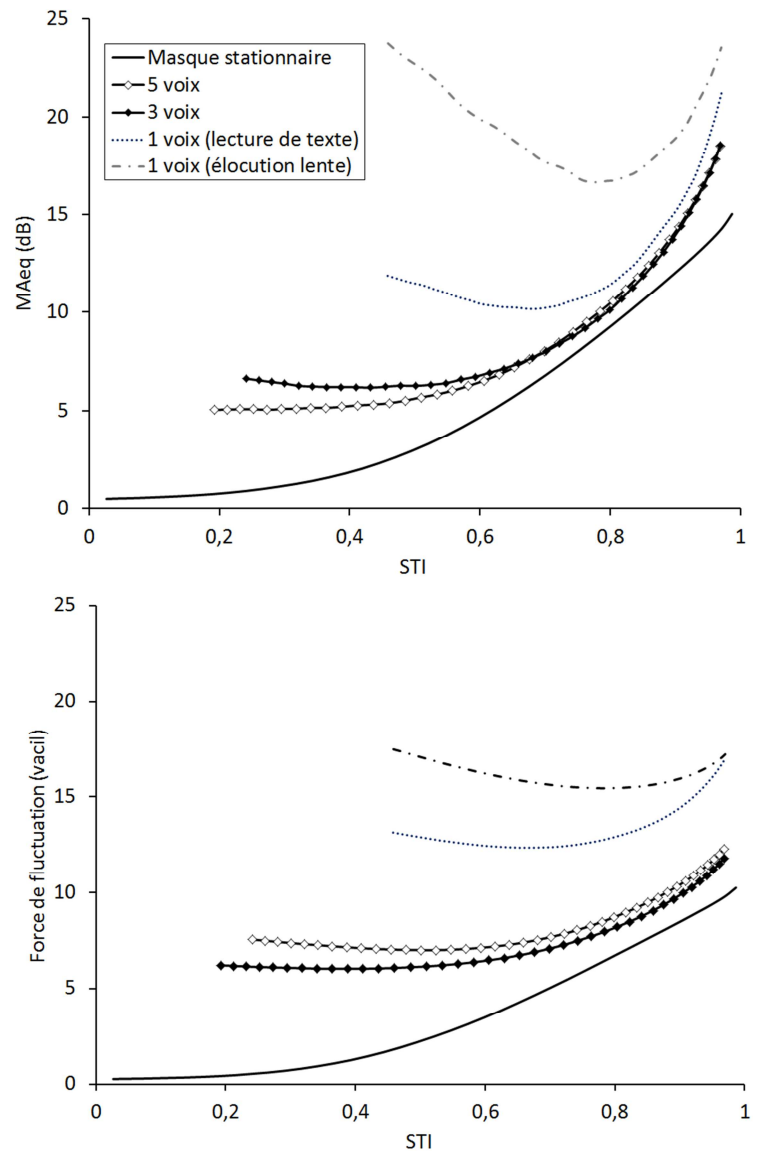
Plus dans l'esprit des indicateurs utilisés dans l'environnement, les récents travaux réalisés à l'INRS (Kostallari et al., 2016) ont permis de dégager un nouvel indicateur du taux d'intelligibilité plus simple que la force de fluctuation et dont la définition est moins opaque. Cet indicateur consiste à calculer la profondeur de modulation d'un signal en faisant la différence entre l'indice fractile 90 et le niveau moyen. Cette analyse est réalisée par bande d'octave, à une cadence d'échantillonnage de 125 ms afin de suivre les fluctuations dont la fréquence est inférieure ou égale à 4 Hz. L'expression analytique de cet indicateur est :

$$MAeq = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N LAeq^i - LAeq_{125}^{90,i} \quad [\text{dB}] \quad (26)$$

Le signal, constitué du mélange de bruit dans le local, est donc enregistré, pondéré A par bande d'octave i . Le signal issu de chaque banc de filtres est ensuite intégré à la cadence de 125 ms pour donner un niveau moyen ($LAeq^i$) et un niveau d'indice fractile 90 ($LAeq_{125}^{90,i}$). L'indicateur global est égal, finalement, à la différence entre ces deux grandeurs moyennée sur les bandes d'octave considérées, typiquement de 125 Hz à 8 kHz. De la même façon que pour la force de fluctuation, le Meq pondéré A ne permet de déterminer qu'un taux d'intelligibilité dans un signal de mélange et non un rapport signal sur bruit. C'est ce qu'illustre la figure 32 qui représente les indices associés au taux d'intelligibilité ($MAeq$ et force de fluctuation) en fonction du STI . Il est à noter que le comportement général de ces deux indicateurs est similaire : une forme parabolique dont le point minimum correspond à un mélange pour lequel le signal cible est aussi intelligible que le signal masque. Pour un STI inférieur à ce point minimum, l'intelligibilité du signal masque l'emporte. Le signal cible perd alors en intelligibilité mais le taux d'intelligibilité du mélange augmente. Cette forme est d'autant plus marquée que le signal masque est intelligible.

Figure 32

Evolution du taux d'intelligibilité en fonction du STI. (haut) MAeq, (bas) Force de fluctuation. La voix cible est constituée de phrases lues avec une élocution lente. L'axe des abscisses intitulé STI correspond en réalité au STI_t de Brocolini et al. (2015) qui tient compte des variations temporelles de niveau du bruit masquant.



3. Evaluation de l'ISE à l'aide d'un indicateur d'intelligibilité

Les effets du bruit sur les fonctions cognitives peuvent se mesurer de façon objective en estimant la performance du sujet dans la réalisation de sa tâche ou de façon subjective en lui demandant par exemple d'évaluer sa difficulté à réaliser de la tâche.

La méthode de mesure de l'ISE, déployée en laboratoire, part du principe qu'il existe un descripteur physique et que ce descripteur est en lien direct avec l'intelligibilité des conversations. La plupart des expériences en laboratoire consistent donc à évaluer les fonctions cognitives en présence de signaux à caractère plus ou moins intelligible, donc pour différentes valeurs de l'indicateur d'intelligibilité.

3.1. Mesure objective de l'ISE

Les effets sonores indésirables lors de la réalisation d'une tâche peuvent être mesurés de façon objective en comptant le nombre moyen d'erreurs faites par les sujets lors de la réalisation de la tâche. Dans l'optique d'une comparaison entre les tests, c'est souvent le décrement de performance par rapport à une tâche de référence qui est utilisé.

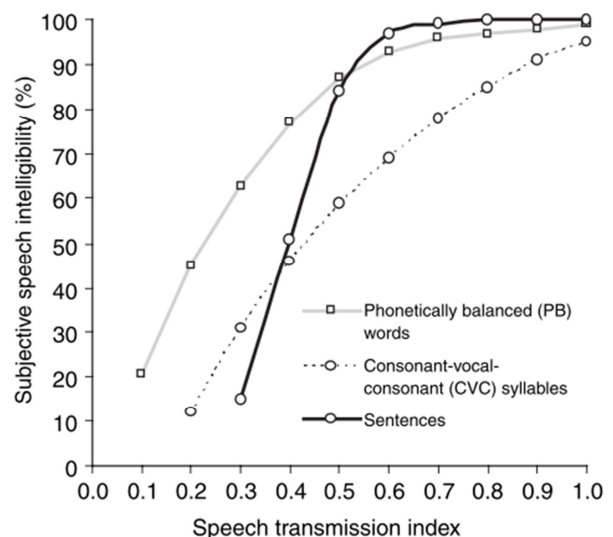
Une compilation récente de résultats d'expériences en laboratoire et d'observations en entreprise portant sur l'évaluation du décrement de performance lors de la réalisation d'une tâche sollicitant la mémoire de travail a permis à (Hongisto, 2005) de proposer un modèle mathématique du décrement de performance en fonction du *STI*. Ce modèle conjecture une forme sigmoïdale et fait l'hypothèse que l'accroissement maximal du décrement de performance se produit au point d'inflexion de la courbe d'intelligibilité correspondant au seuil de détection de la parole (SRT), c'est-à-dire à $STI = 0,4$ (figure 33). Son allure est présentée sur la figure 34 et son expression est :

$$DP = \frac{-7}{1 + \exp\left(\frac{STI - 0,4}{0,06}\right)} + 7 \quad [\%] \quad (27)$$

Les tests en laboratoire qui ont servi à l'élaboration de ce modèle regroupaient des tâches différentes : mémoire sérielle (Ellermeier and Hellbrück, 1998) et correction de texte (non publié). Les observations en entreprise portaient sur une auto-estimation du temps perdu au travail en fonction de l'intelligibilité dans différents open-spaces.

Figure 33

Scores d'intelligibilité pour des syllabes, des mots et des phrases en fonction du *STI*. Tiré de la norme (IEC-60268-16, 2003). Pour la courbe d'intelligibilité des phrases, le seuil à 50% (SRT) est atteint à $STI = 0,4$.

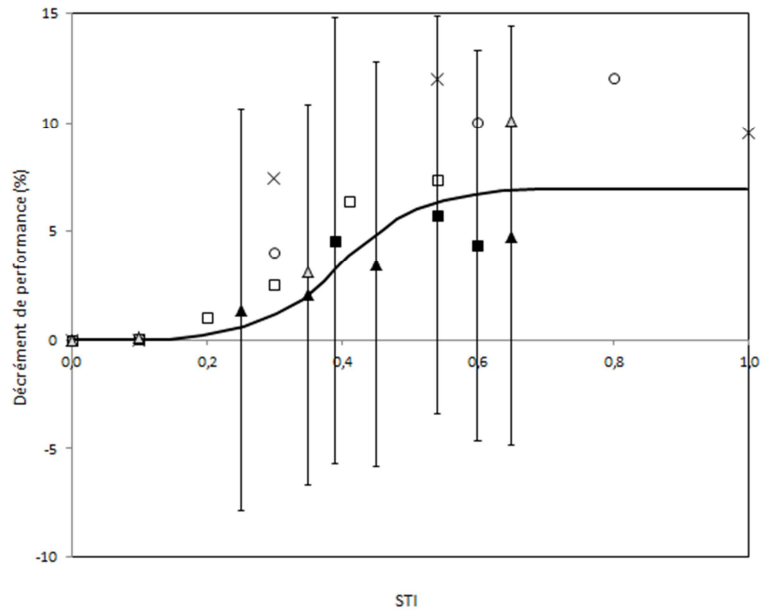


Depuis la publication de ce modèle, d'autres essais en laboratoire ont été réalisés mais, en définitive, il est difficile de faire une comparaison directe des résultats tant les conditions d'essais (tâches, déroulement des tests, contenu sonore) sont différentes. Néanmoins sur la figure 34, ont été

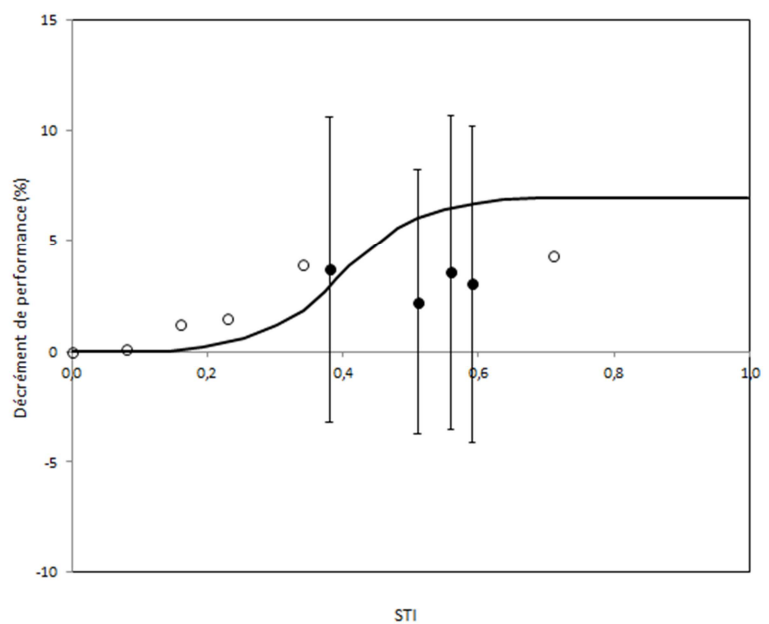
rassemblées les valeurs de décrétement de performance obtenues pour des tests de mémoire sérielle sur des chiffres (figure du haut) (Ellermeier and Hellbrück, 1998; Schlittmeier et al., 2008; Haka et al., 2009; Ebissou et al., 2015) et des tests de mémoire catégorielle sur des mots (figure du bas) (Jahncke et al., 2013; Brocolini et al., 2016).

Figure 34

Valeurs moyennes et écart-types du décrétement de performance en fonction du STI. Expériences en laboratoire et modèle de (Hongisto, 2005). Figure du haut : tâches de mémoire sérielle sur des chiffres. Figure du bas : tâche de mémoire sérielle catégorielle sur des mots.



- × Ellermeier and Hellbrück (1998) Exp 2A
- Schlittmeier et al (2008)
- ▲ Ebissou (2014) Exp 1
- Hongisto (2005)
- Ellermeier and Hellbrück (1998) Exp 2B
- △ Haka et al (2009)
- Ebissou (2014) Exp 2

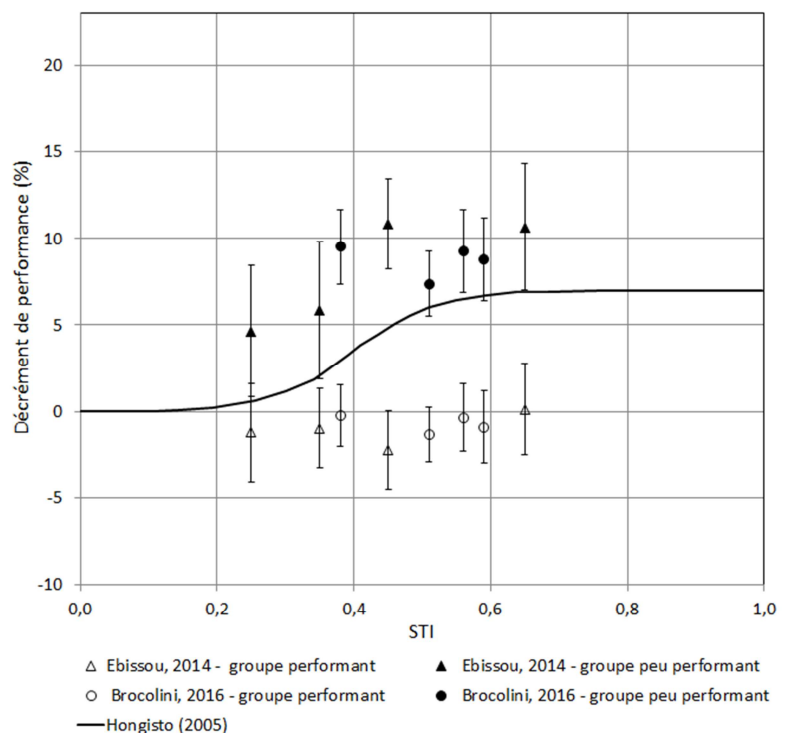


- Jahncke et al (2013)
- Brocolini (2016)
- Hongisto (2005)

Sur ces figures, il est notable que les expériences réalisées depuis 2014 par les équipes du LVA et de l'INRS ((Ebissou et al., 2015) - Exp1 et Exp2) et (Brocolini et al., 2016) ne confirment qu'en partie les résultats de la littérature. Pour la première expérience d'Ebissou (Exp1), le signal masquant est un bruit blanc filtré par la réponse impulsionnelle modélisée de différents locaux de travail. Le signal est donc stationnaire et le *STI* est calculé selon la méthode standard de la norme (IEC-60268-16, 2003). Un décrétement de performance apparaît bien lorsque le *STI* augmente, mais ce décrétement est légèrement inférieur à celui prédit par le modèle de Hongisto. Pour la seconde expérience d'Ebissou (Exp2) ainsi que pour l'expérience de Brocolini, le bruit de masquage est composé de bruit de paroles plus ou moins variables selon le nombre de voix superposées. Le *STI* est alors calculé à l'aide de la méthode du *STI* glissant. Dans l'expérience d'Ebissou, les voix masquantes sont ajoutées sans aucune manipulation de signal alors qu'elles sont retournées temporellement dans l'expérience de Brocolini afin de les rendre totalement inintelligibles. D'une manière générale, nous obtenons des décrétements de performance en dessous du modèle de Hongisto et parfois très en dessous des autres résultats de la littérature, en particulier pour les valeurs de *STI* supérieures à 0,4 de l'expérience de Brocolini. Il semble donc que l'impact du bruit sur la mémoire sérielle soit différent selon la tâche de sériation considérée. Les processus cognitifs engagés pour le rappel de mots semblent moins sensibles à l'hypothèse de changement d'état.

Il faut aussi noter que les écart-types obtenus lors de ces expériences sont très grands, indiquant une très forte variabilité interindividuelle (voir figure 35). En effet, pour les deux expériences, une classification hiérarchique a permis de mettre en évidence deux groupes de même taille, l'un très performant quelle que soit la condition sonore et l'autre, beaucoup plus sensible à la variation d'intelligibilité du signal perturbateur. Pour ce second groupe, le décrétement de performances atteint rapidement 5 %, dès que le bruit de parole devient intelligible ($STI \approx 0,2$) et croît progressivement jusqu'à environ 10 %. Ces résultats sur la variabilité interindividuelle ont été observés dans d'autres études en laboratoire, notamment par (Ellermeier and Zimmer, 1997) ou (Ljung et al., 2013). Ils sont à prendre en compte dans l'interprétation des résultats, en particulier pour les mesures de terrain où la population représente en général la plupart des tranches d'âge, des milieux sociaux, culturels, en définitive, une population potentiellement sujette à de grandes variabilités interindividuelles.

Figure 35
Valeurs moyennes et écart-types du décrétement de performance en fonction de l'intelligibilité des bruits de parole. Mise en évidence de deux groupes.



3.2. Mesure subjective de l'ISE

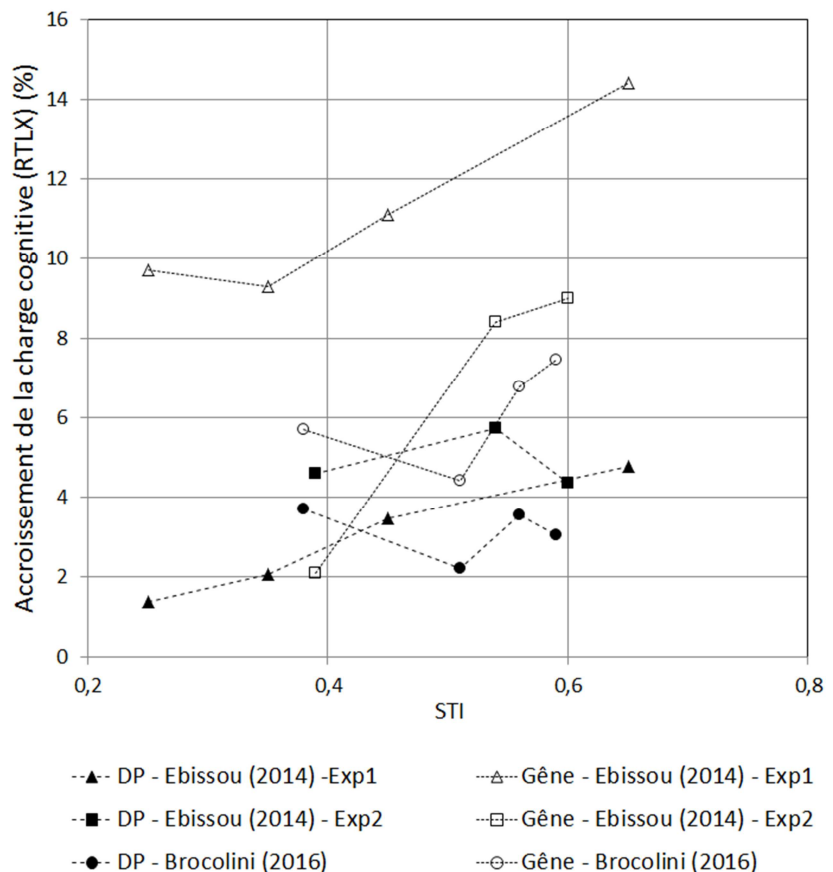
Le décrétement de performance est la mesure de l'ISE la plus courante car elle est objective. La mesure subjective s'appuie quant à elle sur des questionnaires d'autoévaluation des effets du bruit. Ces questionnaires peuvent porter sur des notions très différentes telles que la gêne, la concentration, la vigilance, la fatigue, la motivation, le bien-être, *etc.* et dont la définition est parfois discutable. Ils peuvent également être réduits à une seule question comme c'est le cas dans l'étude de la gêne de (Schlittmeier et al., 2008) (« Combien – sur une échelle de 1 à 5 – le fond sonore est-il perturbant pour vous dans cette expérience ? ») ou porter sur une analyse multifactorielle à l'aide de questionnaires plus complets tels que le NASA-TLX (Hart and Staveland, 1988) dans l'étude de (Ebissou et al., 2015), le EZ-Scale (Nitsch and Udris, 1976) dans l'étude de (Liebl et al., 2012) ou le SOFI (Åhsberg et al., 1997), comme c'est le cas pour l'étude de la fatigue perçue de (Jahncke et al., 2011). Il est possible d'étendre cette liste à des questionnaires utilisés dans différents domaines de la psychologie (Schütte, 2009).

Dans la mesure où les recherches reposent sur des outils différents et portent sur des descripteurs différents, il est difficile de montrer une comparaison directe des résultats. Néanmoins, toutes les études indiquent que les personnes soumises à un bruit ambiant très intelligible se disent plus perturbées que celles soumises à un bruit faiblement intelligible. Elles montrent également que la mesure subjective de la perturbation est plus sensible que la mesure objective (Schlittmeier et al., 2008; Haka et al., 2009). C'est un résultat que nous pouvons confirmer par nos travaux (Ebissou et al., 2015; Brocolini et al., 2016). Sur la figure 36, il apparaît effectivement que les variations de la gêne

ressentie sont plus marquées que le décrétement de performance et que les effets sont en général plus significatifs. Néanmoins, la question de la variabilité interindividuelle persiste. Elle vient s'ajouter à celle du choix de la variable descriptive.

Figure 36

Décrétement de performance et accroissement de la gêne en fonction du STI. Résultats d'essais en laboratoire réalisés par (Ebissou et al., 2015; Brocolini et al., 2016).

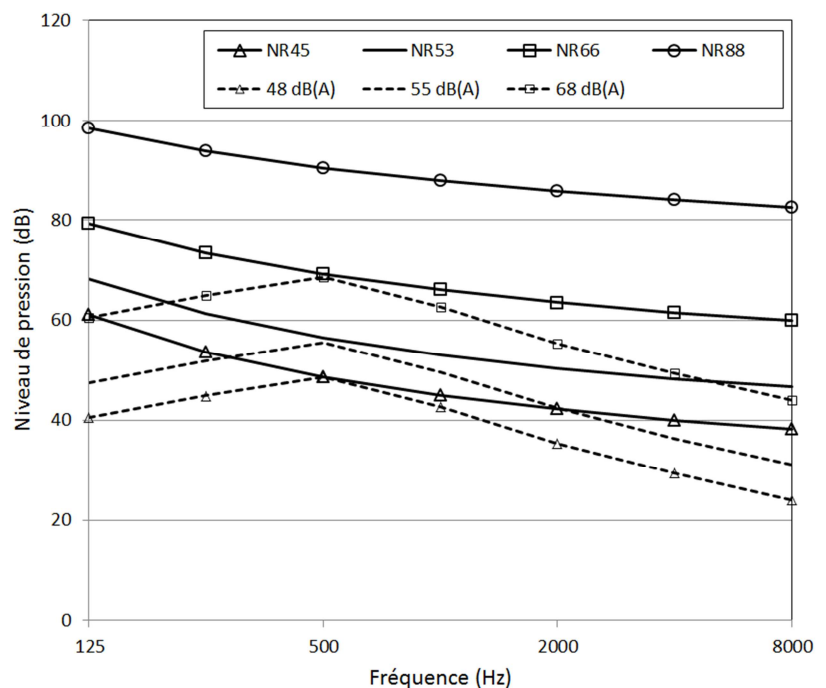


4. Discussion sur l'applicabilité des connaissances concernant l'ISE

En France, depuis les travaux d'Alain Wisner dans les années 1970, l'usage chez les préventeurs en entreprise est de s'appuyer sur les courbes dites « de Wisner » pour déterminer le degré de gêne liée à la présence de bruit ambiant. Ces courbes sont basées sur les courbes NR (Noise Rating) définies dans la norme (ISO/R-1996, 1971), courbes qui représentent des gabarits de niveaux sonores en fonction de la fréquence, permettant de caractériser l'acceptabilité d'un environnement sonore. A noter qu'on ne trouve plus trace de ces courbes dans la plus récente révision de 2016 de la norme ni dans aucune norme de l'ISO. Partant des courbes NR donc, Wisner définit, sur la base de son expérience et de ses travaux en laboratoire, 4 zones de gêne à partir de 3 courbes NR : en dessous de la courbe N45, il considère que « le sommeil et le travail intellectuel complexe ne sont pas gênés de façon appréciable ». Entre les courbes NR45 et NR66, « le travail intellectuel est pénible, le travail courant administratif ou commercial n'est pas gêné de façon nette ». Entre les courbes NR66 et

NR88, « le travail intellectuel est extrêmement pénible, le travail administratif courant est difficile, le travail d'atelier n'est pas gêné de façon appréciable ». Au-dessus de la courbe NR88, « on se trouve dans la région où une exposition prolongée détermine la surdité professionnelle ». Compte tenu de l'avancement des connaissances à l'époque, Wisner, avec prudence, précise : (sic) « Il ne faut pas attribuer aux critères, qui viennent d'être présentés, une valeur scientifique rigoureuse. Cependant, ils sont d'une utilité certaine dans la pratique industrielle ». Il est vrai que si l'on doit prendre en compte tous les secteurs industriels, la plage des niveaux de bruit rencontrée s'étend bien sur toute la dynamique des courbes de Wisner et le partage selon ces quatre zones fait sens. Dans le cas du tertiaire et des open-spaces en particulier, la dynamique des niveaux est beaucoup plus restreinte. Pour illustrer ceci, nous avons ajouté aux courbes NR de la figure 37, les spectres de parole normalisés (ISO 3382-3, 2012) correspondant aux niveaux globaux 48 dB(A), 55 dB(A) et 63 dB(A). 55 dB(A) correspondent au niveau de bruit ambiant moyen mesuré par l'INRS dans différents open-spaces durant cette dernière décennie. La courbe NR correspondant à cette valeur est la courbe NR53. Les courbes NR45 et NR66, qui délimitent la deuxième zone de Wisner correspondent respectivement aux niveaux 48 dB(A) et 68 dB(A), c'est-à-dire à la quasi-totalité des open-spaces actuels... L'application des travaux de Wisner aux open-spaces pourrait conduire à la définition d'une valeur cible de 48 dB(A) pour le bruit ambiant, valeur qui permettrait donc aux occupants de pouvoir exercer une activité intellectuelle sans être gênés par le bruit. A titre de comparaison et pour mention seulement, la norme américaine (ANSI-S12.2, 2008) recommande la plage NC35-NC40 pour les open-spaces ce qui correspond à la plage de niveaux globaux 39-43 dB(A) pour le bruit de parole de la norme (ISO-3382-3, 2012). Il est clair que ces valeurs sont très faibles en regard de ce que l'on peut mesurer aujourd'hui dans les espaces de bureaux.

Figure 37
Courbes NR encadrant les zones définies par (Wisner, 1970) et, en pointillés, spectres de parole (ISO3382-3, 2012) pour différents niveaux globaux.



Les études réalisées sur l'ISE depuis les années 1990 apportent des éléments nouveaux. En particulier, ils précisent que l'intensité sonore, dans une plage de 48 à 76 dB(A), n'a pas d'effet significatif sur les fonctions cognitives et ne semble pas engendrer une surcharge cognitive. Cette plage, sur les courbes de Wisner correspond à la deuxième zone et à une partie de la troisième zone. Mais la conclusion la plus intéressante de ces travaux est que les émergences du bruit de parole (traduites en termes d'intelligibilité) constituent le principal facteur contribuant à la gêne. Par ailleurs, plus le rapport entre l'intensité du bruit de parole et l'intensité du fond sonore est élevé, plus la gêne est importante. C'est ce qu'ont cherché à démontrer les plus récentes expériences en laboratoire sur l'ISE avec le développement du modèle de prédiction de Hongisto.

Son principal mérite est de conduire à des valeurs cibles de distance d'éloignement par rapport à la source de parole. D'après le modèle, la confidentialité (privacité) des discussions est préservée jusqu'à la distance r_p pour laquelle le STI est égal à 0,2 (valeur correspondant au début de l'augmentation de l'ISE) et le confort est garanti jusqu'à la distance de discrétion r_d pour laquelle le STI est égal à 0,5 (valeur pour laquelle le décrétement de performance est stabilisé). Ces recommandations se retrouvent dans la norme (ISO-3382-3, 2012). On peut admettre le caractère louable de la démarche puisque la définition de telles distances permettrait de donner des règles de conception et d'aménagement des open-spaces. Cependant, il convient de s'interroger sur la précision de l'évaluation puisque les résultats de laboratoire les plus récents montrent une dispersion importante de l'ISE en fonction du STI . Une analyse d'erreur d'estimation de la distance en fonction du STI conduit à l'expression :

$$\frac{\Delta r}{r} = \frac{30 \times \ln 2}{D_{2S}} \times \Delta STI \quad , \quad (28)$$

en partant de l'expression simplifiée $SNR = 30 \times STI + 15$. Une erreur de 0,1 sur l'estimation de la valeur optimale du STI conduit à une erreur de 69 % sur l'estimation de la distance de privacité ou de confort pour une décroissance de 3 dB, ou 35 % pour une décroissance de 6 dB. Une telle indétermination n'est évidemment pas sans conséquence sur l'aménagement d'un plateau. Elle invite donc à poursuivre les tests en laboratoire en apportant davantage de contrôle sur les conditions d'essais afin d'être plus précis sur l'estimation de l'ISE. Notamment, il convient d'être plus rigoureux sur le choix des tâches et des conditions sonores car c'est la validité écologique de l'expérience qui est en jeu à ce niveau. Dans le cas des open-spaces, comme dans beaucoup de situations de travail, la mémoire à court terme est celle qui est la plus sollicitée pour la réalisation des tâches. Comme le précise (Sörqvist, 2014), les tâches complexes comme les tâches de calcul mental (Banbury and Berry, 1998), la compréhension de textes (Hughes et al., 2013), l'écriture (Flower and Hayes, 1981), qui impliquent un « conglomérat » de processus cognitifs, ne peuvent pas être utilisées pour analyser les effets cognitifs d'un facteur physique sur la simple mémoire à court terme car elles font appel à des processus qui dépassent largement ce cadre (la mémoire épisodique par exemple). A contrario, les tests de mémoires sérielles simples (de type rappel de chiffres) en présence de bruit d'open-space contrôlés renseigneront sur les effets cognitifs du bruit d'open-space sur la mémoire à court terme,

suggérant un effet probablement délétère sur les personnes à leur poste de travail. Placer les personnes pendant les tests dans une situation sonore similaire à celle d'un open-space, en leur faisant réaliser des tâches complexes proches de celles qu'elles ont à produire au quotidien, est une autre possibilité, dont les résultats pourront être interprétés d'un point de vue comportemental ou contextuel et non d'un point de vue cognitif. La difficulté étant de déterminer une situation de test générique valant pour tous les open-spaces, ou plusieurs situations représentatives des différents types d'open-spaces, avec l'inconvénient que cela implique de multiplier les tests.

Un dernier aspect, qui n'a pas été évoqué jusqu'ici est celui des mesures physiologiques telles que rythme cardiovasculaire, pression sanguine, dosage de certaines hormones (épinéphrine, norépinéphrine ou cortisol) dans l'urine ou dans la salive pour l'évaluation du stress d'un côté ou la mesure des potentiels évoqués à l'aide d'électroencéphalogrammes d'un autre côté. En ce qui concerne le premier point, aucun lien significatif n'a pu être trouvé entre l'ISE et les paramètres physiologiques cités pour des bruits similaires à ceux que l'on peut trouver dans les open-spaces (Evans and Johnson, 2000; Jahncke et al., 2011). Concernant la mesure des potentiels évoqués, les recherches les plus récentes semblent indiquer un effet des fluctuations sonores sur certaines ondes cérébrales (N1, P3a de fréquence gamma) (Bell et al., 2010; Schlittmeier et al., 2011), confirmant les tests en laboratoire. Ces travaux sont d'un intérêt scientifique évident et apporteront certainement dans un avenir plus ou moins proche des connaissances importantes sur le fonctionnement du cerveau. Cependant, beaucoup de progrès restent à faire sur l'interprétation des variations des marqueurs selon le type de bruit en présence.

Références bibliographiques

- Åhsberg, E., F. Garnberale and A. Kjellberg (1997). "Perceived quality of fatigue during different occupational tasks development of a questionnaire." International Journal of Industrial Ergonomics **20**(2): 121-135.
- ANSI-S12.2 (2008). Criteria for Evaluating Room Noise
- ANSI-S-3.5 (1997). Methods for the calculation of the speech intelligibility index.
- Aures, v. W. (1985). "A procedure for calculating auditory roughness." Acustica **58**(5): 268-281.
- Banbury, S. and D. C. Berry (1998). "Disruption of office-related tasks by speech and office noise." British Journal of Psychology **89**(3): 499-517.
- Bell, R., S. Dentale, A. Buchner and S. Mayr (2010). "ERP correlates of the irrelevant sound effect." Psychophysiology **47**(6): 1182-1191.
- Brocolini, L., E. Parizet and P. Chevret (2016). "Effect of masking noise on cognitive performance and annoyance in open plan offices." Applied Acoustics **114**: 44-55.
- Buchner, A. (1996). "On the irrelevance of semantic information for the Illrrelevant speech effect." The Quarterly Journal of Experimental Psychology: Section A **49**(3): 765-779.

- Cherry, E. C. (1953). "Some experiments on the recognition of speech, with one and with two ears." The Journal of the Acoustical Society of America **25**(5): 975-979.
- Chevret, P. (2016). "Release from masking of speech intelligibility due to fluctuating ambient noise in open-plan offices." Applied Acoustics **101**: 156-167.
- Colle, H. A. and A. Welsh (1976). "Acoustic masking in primary memory." Journal of verbal learning and verbal behavior **15**(1): 17-31.
- Daniel, P. and R. Weber (1997). "Psychoacoustical roughness: Implementation of an optimized model." Acta Acustica united with Acustica **83**(1): 113-123.
- Ebissou, A. (2013). Gêne sonore en bureaux ouverts: Impact de la présence de plusieurs voix intelligibles, INSA de Lyon.
- Ebissou, A., E. Parizet and P. Chevret (2015). "Use of the Speech Transmission Index for the assessment of sound annoyance in open-plan offices." Applied Acoustics **88**(0): 90-95.
- Ellermeier, W. and J. Hellbrück (1998). "Is level irrelevant in "irrelevant speech"? Effects of loudness, signal-to-noise ratio, and binaural unmasking." Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance **24**(5): 1406.
- Ellermeier, W. and K. Zimmer (1997). "Individual differences in susceptibility to the "irrelevant speech effect"." The Journal of the Acoustical Society of America **102**(4): 2191-2199.
- Evans, G. W. and D. Johnson (2000). "Stress and open-office noise." Journal of applied psychology **85**(5): 779.
- Flower, L. and J. R. Hayes (1981). "A cognitive process theory of writing." College composition and communication **32**(4): 365-387.
- Haka, M., A. Haapakangas, J. Keränen, J. Hakala, E. Keskinen and V. Hongisto (2009). "Performance effects and subjective disturbance of speech in acoustically different office types—a laboratory experiment." Indoor Air **19**(6): 454-467.
- Hart, S. G. and L. E. Staveland (1988). "Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of empirical and theoretical research." Advances in psychology **52**: 139-183.
- Hongisto, V. (2005). "A model predicting the effect of speech of varying intelligibility on work performance." Indoor Air **15**(6): 458-468.
- Hughes, R. W. (2014). "Auditory distraction: A duplex-mechanism account." PsyCh journal **3**(1): 30-41.
- Hughes, R. W., M. J. Hurlstone, J. E. Marsh, F. Vachon and D. M. Jones (2013). "Cognitive control of auditory distraction: impact of task difficulty, foreknowledge, and working memory capacity supports duplex-mechanism account." Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance **39**(2): 539.
- Hughes, R. W. and D. M. Jones (2005). "The impact of order incongruence between a task-irrelevant auditory sequence and a task-relevant visual sequence." Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance **31**(2): 316.
- IEC-60268-16 (2003). Sound system equipment Part 16.
- ISO-3382-3 (2012). Acoustique -- Mesurage des paramètres acoustiques des salles -- Partie 3: Bureaux ouverts.

- ISO/R-1996 (1971). Acoustics -- Assessment of noise with respect to community response.
- Jahncke, H., V. Hongisto and P. Virjonen (2013). "Cognitive performance during irrelevant speech: effects of speech intelligibility and office-task characteristics." Applied Acoustics **74**(3): 307-316.
- Jahncke, H., S. Hygge, N. Halin, A. M. Green and K. Dimberg (2011). "Open-plan office noise: Cognitive performance and restoration." Journal of Environmental Psychology **31**(4): 373-382.
- Jones, D. (1993). "Objects, streams, and threads of auditory attention."
- Jones, D., C. Madden and C. Miles (1992). "Privileged access by irrelevant speech to short-term memory: The role of changing state." The Quarterly Journal of Experimental Psychology **44**(4): 645-669.
- Kostallari, K., E. Parizet and P. Chevret (2016). Indicateurs de confort acoustique dans les bureaux ouverts. 13ème Congrès Français d'Acoustique, Le Mans.
- Liebl, A., J. Haller, B. Jödicke, H. Baumgartner, S. Schlittmeier and J. Hellbrück (2012). "Combined effects of acoustic and visual distraction on cognitive performance and well-being." Applied Ergonomics **43**(2): 424-434.
- Ljung, R., K. Israelsson and S. Hygge (2013). "Speech Intelligibility and Recall of Spoken Material Heard at Different Signal-to-noise Ratios and the Role Played by Working Memory Capacity." Applied Cognitive Psychology **27**(2): 198-203.
- Moore, B. (1997). "An introduction to the psychology of hearing (Academic, San Diego)." and **313**: 159-167.
- Nitsch, J. and I. Udris (1976). "Die Eigenzustandsskalierung-Ein Verfahren zur hierarchischen-mehrdimensionalen Befindlichkeitsskalierung." Nitsch JR. Udris I, eds. Beanspruchung im Sport. Verlag Limbert.
- Rhebergen, K. S. and N. J. Versfeld (2005). "A speech intelligibility index-based approach to predict the speech reception threshold for sentences in fluctuating noise for normal-hearing listeners." The Journal of the Acoustical Society of America **117**(4): 2181-2192.
- Rhebergen, K. S., N. J. Versfeld and W. A. Dreschler (2006). "Extended speech intelligibility index for the prediction of the speech reception threshold in fluctuating noise." The Journal of the Acoustical Society of America **120**(6): 3988-3997.
- Salame, P. and A. Baddeley (1982). "Disruption of short-term memory by unattended speech: Implications for the structure of working memory." Journal of verbal learning and verbal behavior **21**(2): 150-164.
- Schlittmeier, S., J. Hellbrück, R. Thaden and M. Vorländer (2008). "The impact of background speech varying in intelligibility: Effects on cognitive performance and perceived disturbance." Ergonomics **51**(5): 719-736.
- Schlittmeier, S. J., T. Weißgerber, S. Kerber, H. Fastl and J. Hellbrück (2012). "Algorithmic modeling of the irrelevant sound effect (ISE) by the hearing sensation fluctuation strength." Attention, Perception, & Psychophysics **74**(1): 194-203.

- Schlittmeier, S. J., N. Weisz and O. Bertrand (2011). "What characterizes changing-state speech in affecting short-term memory? An EEG study on the irrelevant sound effect." Psychophysiology **48**(12): 1669-1680.
- Schütte, M. (2009). "30 Methods for Measuring Mental Stress and Strain." Industrial Engineering and Ergonomics: Visions, Concepts, Methods and Tools Festschrift in Honor of Professor Holger Luczak: 395.
- Sörqvist, P. (2014). "On interpretation and task selection in studies on the effects of noise on cognitive performance." Frontiers in Psychology **5**: 1249.
- Sörqvist, P., A. Nörtl and N. Halin (2012). "Disruption of writing processes by the semanticity of background speech." Scandinavian Journal of Psychology **53**(2): 97-102.
- Steeneken, H. J. and T. Houtgast (1980). "A physical method for measuring speech-transmission quality." The Journal of the Acoustical Society of America **67**(1): 318-326.
- Tremblay, S. and D. M. Jones (1999). "Change of intensity fails to produce an irrelevant sound effect: Implications for the representation of unattended sound." Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance **25**(4): 1005.
- van de Poll, M. K., R. Ljung, J. Odelius and P. Sörqvist (2014). "Disruption of writing by background speech: The role of speech transmission index." Applied Acoustics **81**: 15-18.
- Wisner, A. (1970). "Manuel Bruits et Vibrations." Chapitre II Eléments de Physiologie et de Pathologie des Bruits. Edition INRS(254).
- Zwicker, E. and H. Fastl (1990). Psychoacoustics, Facts and Models, Springer-Verlag.

Chapitre 3

Impact réel du bruit sur les salariés travaillant en open-spaces

Les enquêtes de terrain en bureaux ouverts ont pour nous un double intérêt. Le premier est de répondre à une problématique spécifique concernant l'installation d'un nouveau site ou la rénovation d'un site existant. Le second est de nous apporter des données complémentaires sur l'ISE afin de pouvoir réaliser des essais en laboratoire.

De nombreuses enquêtes de terrain ont été conduites depuis les années 60, toutes ont démontré que le bruit avait un effet négatif sur la perception de l'environnement de travail. Parmi les plus récentes, citons (Ayr et al., 2001), (Pejtersen et al., 2006), (Jensen and Arens, 2005). (*Haapakangas et al., 2008*) (Kaarlela-Tuomaala et al., 2009). Il est cependant très difficile de faire un état des lieux des

connaissances et des résultats obtenus lors des différentes enquêtes réalisées dans les open-spaces depuis plusieurs décennies, tant les contextes et les attendus sont différents à chaque fois. Aussi nous proposons dans cette partie de nous centrer principalement sur les enquêtes et observations réalisées par l'INRS depuis 2014, dans le cadre des études dont j'ai eu la responsabilité, en jetant, lorsque nécessaire, des ponts vers d'autres résultats importants présentés dans la littérature.

1. Le questionnaire GABO

En 2014, le laboratoire d'acoustique de l'INRS et le laboratoire de vibrations et acoustique de l'INSA de Lyon ont conçu, pour l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (ANSES), un questionnaire dédié spécifiquement à l'évaluation de la gêne sonore dans les open-spaces. Ce questionnaire, intitulé GABO (Gêne Acoustique dans les Bureaux Ouverts) contient au final une centaine de questions, réparties en 4 grandes thématiques (Pierrette et al., 2014).

La première vise à évaluer la satisfaction des employés vis-à-vis de leur environnement physique de travail. Les informations recueillies auprès des personnes concernent leur genre, leur âge, leur ancienneté dans la société, leur ancienneté dans leur poste, et le nombre de personnes qui travaillent dans le même espace. Une échelle en 14 points permet de mesurer la satisfaction selon deux dimensions : la privacité, vue comme la possibilité de contrôler l'environnement, et le confort, c'est-à-dire la fonctionnalité du poste de travail (Fleury-Bahi and Marcouyeux, 2011).

La deuxième thématique concerne l'évaluation de l'environnement sonore du lieu de travail. Dans cette partie, le questionnaire interroge les individus sur leur perception de l'intensité et de la gêne sonore, puis se focalise sur cinq types de sources qui sont celles que l'on rencontre le plus fréquemment dans les open-spaces et/ou qui sont généralement citées comme le plus gênantes (Nemecek and Grandjean 1973; Sundstrom et al. 1994). Ce sont les sonneries de téléphone, le bruit des équipements (climatisation, machines informatiques, etc.), le bruit des conversations intelligibles, des conversations inintelligibles et les bruits de passage.

La troisième partie concerne la relation des individus au bruit en général, en dehors du contexte professionnel. Pour cela, le questionnaire utilise trois échelles de sensibilité au bruit, inspirées des travaux de (Weinstein, 1978) qui ont conduit à l'échelle WNS (Weinstein Noise Sensitivity), de ceux de (Zimmer and Ellermeier, 1999) qui ont donné l'échelle LEF (Fragebogen zur Erfassung der individuellen Lärmempfindlichkeit) et des travaux de (Schutte et al., 2007) qui ont abouti au questionnaire NoiseQ (Noise sensitivity Questionnaire).

La dernière partie concerne la santé telle qu'elle est perçue par les individus. Il s'agit d'une reprise du questionnaire SATIN de l'INRS (Grosjean et al., 2007) qui se focalise sur 4 dimensions de la santé : la santé physique perçue, le stress perçu, les douleurs perçues, la santé psychique perçue.

Ce questionnaire est un outil d'analyse mais aussi d'accompagnement et de discussion pour tendre vers un environnement sonore accepté par tous. Il est disponible dans la partie informative de la norme (NF-S31-199, 2016) dédiée aux bureaux ouverts. Il a déjà été utilisé par l'INRS auprès de 27

open-spaces d'entreprises françaises allant de la grande entreprise de téléphonie, du transport, de la banque jusqu'à des PME évoluant dans des secteurs très différents (Perrin Jegen and Chevret, 2016). 627 salariés, occupant des open-spaces de 5 à plus de 200 postes, ont été interrogés. L'analyse des réponses a permis de tirer des enseignements intéressants concernant la perception de l'environnement de travail et l'impact du bruit sur la satisfaction. Les observations et les analyses statistiques ont servi à la définition d'une nouvelle typologie des open-spaces, partant du principe que les solutions de construction, d'aménagement et d'organisation dépendent de l'activité donc du type d'open-space.

2. Perception de l'environnement de travail en open-space

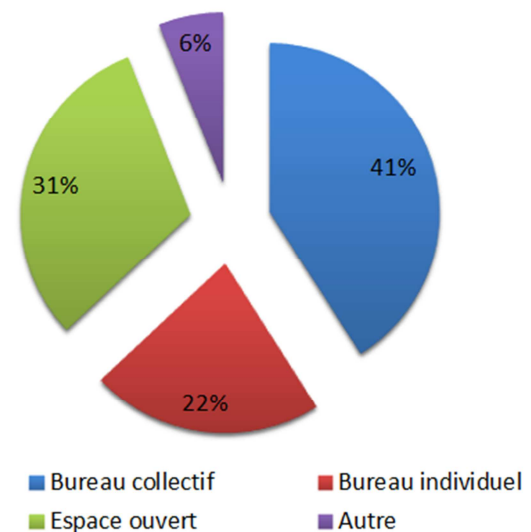
Les débats sur la perception de l'environnement de travail dans un open-space sont influencés, d'un côté, par des sondages d'opinion, scientifiquement discutables, et des récits d'expériences portés en généralité absolue, et d'un autre côté par des opérations de promotion d'entreprises qui diffusent sur internet des photos d'open-spaces qui ressemblent davantage à des photos de vacances qu'à des locaux de travail (figure 38).

Figure 38
Photo des locaux de Google à Tel'Aviv.



Les enquêtes et les observations de terrain sont plus laborieuses mais elles ont le mérite de faire ressortir une image plus réaliste de la situation. Le premier résultat important provenant de l'enquête INRS (2014) concerne la question de l'environnement de travail idéal pour les personnes occupant déjà un open-space. Il ressort que moins d'un tiers des personnes travaillant dans un open-space considère que c'est le lieu de travail idéal, la majorité d'entre-elles souhaitant évoluer vers un bureau collectif partagé par 2 ou 3 personnes. Le bureau individuel n'est pas forcément plébiscité avec seulement 22 % d'avis favorables (figure 39).

Figure 39
Le bureau idéal selon les salariés des open-spaces (enquête INRS, 2014)



Dans une étude similaire, conduite en Finlande, portant sur 11 entreprises, regroupant 689 personnes (Haapakangas et al., 2008), les auteurs parviennent à donner une répartition de la préférence du local de travail pour deux groupes de personnes, le premier travaillant en open-space et le second en bureau privé. Les chercheurs obtiennent que, pour les personnes travaillant en open-space (situation identique à l'enquête INRS 2014), la préférence va à 46,9 % vers le bureau privé, à 32,6 % vers le bureau collectif et à 20,5 % vers l'open-space. Dans cette étude, les salariés rejettent donc encore davantage le principe du bureau ouvert, mais préfèrent quant-à-eux largement le bureau individuel. A noter que les personnes travaillant dans un bureau privé souhaitent à 97,6% rester dans leur bureau. Une photographie réaliste de l'open-space français ou européen n'est donc évidemment pas celle que l'on trouve dans les brochures commerciales des entreprises.

Dans le détail, l'enquête INRS (2014) est éloquent sur le fait que les salariés se disent en général moyennement satisfaits par leur environnement de travail en open-space (moyenne de satisfaction de 2,8 / 5). Il ressort en particulier que c'est la difficulté de contrôler l'environnement qui pénalise l'appréciation puisque la note de satisfaction obtenue est de 2,4 / 5 pour la dimension contrôle contre 3,3 / 5 pour la dimension confort. C'est un résultat important de l'étude, qui confirme les travaux précédents portant sur le sentiment de manque de privacité dans les open-spaces, c'est à dire sur le fait de se sentir perturbé, oppressé par des événements sonores mais aussi des éléments visuels (sentiment de confinement). Pour décrire ce sentiment, on trouve également dans la littérature les termes de manque d'intimité, de confidentialité. La privacité est en fait directement liée au sentiment de pouvoir contrôler l'environnement, à la fois les stimulations qui entrent dans sa sphère d'intimité et les informations qui en sortent. Les enquêtes qui se sont intéressées à la privacité dans les open-spaces (Sundstrom et al., 1982; Sundstrom et al., 1982; Huang et al., 2004; Lee and Brand, 2010) ont en effet toutes démontré une corrélation positive avec la satisfaction au travail ou la satisfaction vis-à-vis l'environnement de travail. Avoir un bureau privé, à soi, est, selon les personnes interrogées, la meilleure façon de préserver son intimité, ce qui semble être une donnée importante dans la réalisation des tâches professionnelles (Sundstrom et al., 1982; Kupritz, 2003). Cependant, les études

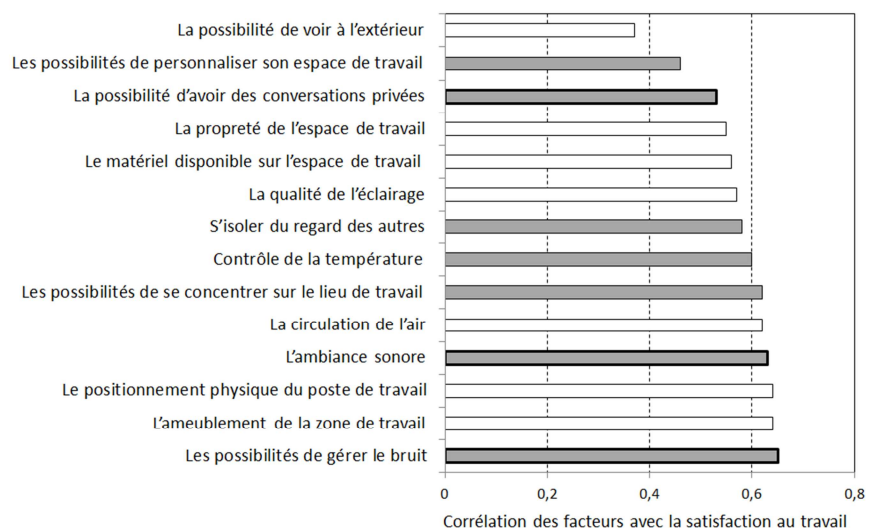
ont aussi montré que la perception de la privacité est vue d'une façon différente selon les classes d'âges et les groupes de travail, souvent liés à des catégories sociales différentes (Sundstrom et al., 1982; Kupritz, 2001).

3. Perception du bruit dans l'open-space

Le bruit joue un rôle essentiel dans la perception de la privacité, même si la perception visuelle en constitue une dimension non négligeable (De Croon et al., 2005). La notion de privacité sonore traduit le fait qu'un individu se sente dérangé dans sa sphère privée par des bruits de conversations, de machines ou d'équipements. Il peut se sentir dérangé pour réaliser une tâche particulière ou lors d'une conversation privée.

A partir des réponses de l'enquête INRS de 2014, une analyse factorielle conduite sur l'ensemble des facteurs associés à l'environnement de travail indique que les facteurs liés au bruit sont très corrélés avec la satisfaction. Ils arrivent avant ceux associés à la température, à la qualité de l'éclairage, à la circulation de l'air ou à la propreté de l'espace de travail (figure 40). On retrouve ce résultat dans la plupart des enquêtes du même genre (Sundstrom et al., 1994; Sailer and Hassenzahl, 2000; SBiB, 2010), ou des expériences de laboratoire pour lesquelles des conditions d'open-space ont été reproduites (Veitch, 1990; Loewen and Suedfeld, 1992; Banbury and Berry, 1997; Evans and Johnson, 2000). L'enquête INRS montre également une forte corrélation entre la satisfaction au travail et la possibilité de gérer le bruit, qui est le principal facteur de contrôle de l'environnement sonore.

Figure 40
Corrélation des facteurs avec la satisfaction au travail (enquête INRS 2014). Les barres blanches correspondent à des facteurs de confort, les grises à des facteurs de contrôle. Les barres grises détournées correspondent directement à la privacité sonore.



Un second point intéressant concerne les effets du niveau de bruit sur la perception de la gêne sonore. Nous avons vu précédemment que sur une plage de 48 à 76 dB(A), les expériences en laboratoire n'indiquent pas d'effets significatifs sur la baisse de performance lors de la réalisation d'une tâche. Les résultats de terrain sont plutôt consistants avec cette observation puisque la corrélation entre les niveaux et la gêne sonore est très faible (0,16), même si les personnes se disent significativement plus gênées pour des niveaux de bruit supérieurs à 56 dB(A) (figure 41). Même

constatation pour les fluctuations du bruit ambiant (figure 42), si ce n'est que les effets sont plus importants : la corrélation est cette fois de 0,29. Ces résultats de terrain doivent cependant être pris avec plusieurs réserves : la première est que la quantité de données est encore insuffisantes à ce stade pour être sûr de la pertinence des distributions obtenues. La seconde est liée à la variabilité des échantillons sonores, variabilité dans le temps qui pose la question de la représentativité de la valeur moyenne utilisée pour l'analyse et de la variabilité de la structure des signaux en fonction des plateaux.

Figure 41
Niveaux de bruit et gêne sonore associée (enquête INRS 2014). La distribution des cercles montre la répartition des réponses individuelles. Les valeurs moyennes et les écart-types pour chaque score de gêne sont également indiqués. La droite de régression apparaît en pointillés.

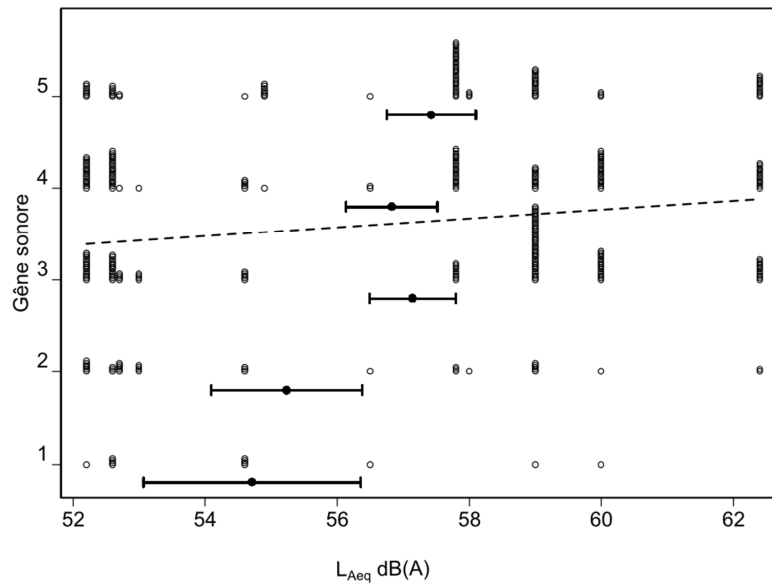
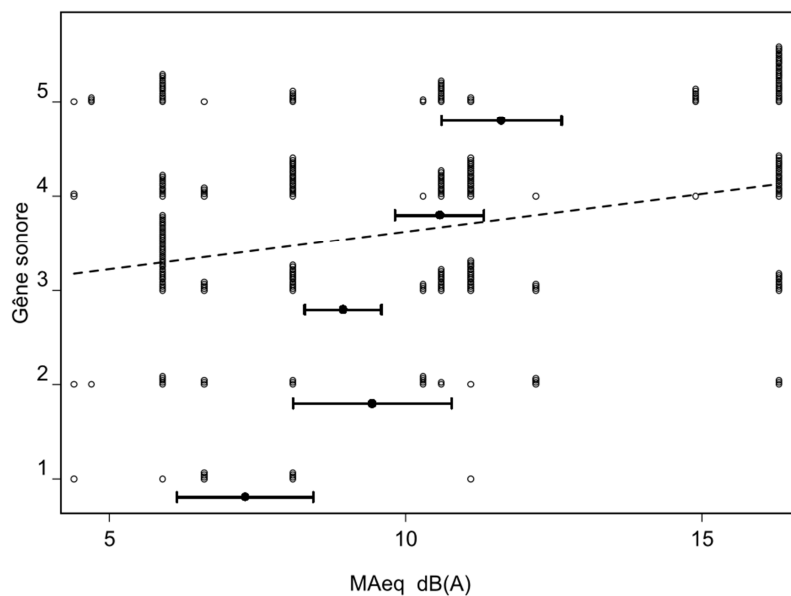


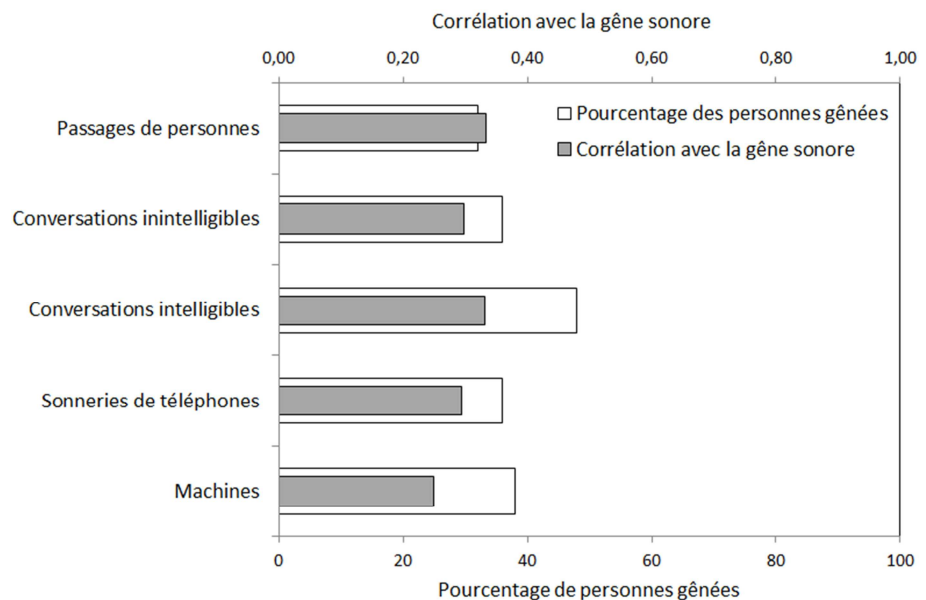
Figure 42
Emergence des niveaux sonores et gêne sonore associée (enquête INRS 2014). Les cercles montrent la répartition des réponses individuelles. Les valeurs moyennes et les écart-types pour chaque score de gêne sont également indiqués. La droite de régression apparaît en pointillés.



Le nombre de sources de bruit est élevé dans un open-space mais elles peuvent se regrouper en seulement quelques catégories. Le questionnaire GABO en distingue 5 : tout d'abord, le bruit des machines qui comprend le bruit des équipements de fonctionnement du local comme la climatisation, le bruit des équipements informatiques, les bruits de passage des véhicules à l'extérieur du bâtiment ou d'autres bruits plus épisodiques. Ensuite, il y a le bruit des sonneries de téléphones, particulièrement présent dans les centres d'appels, puis le bruit des conversations qui peut être dissocié en deux catégories : les conversations intelligibles et les conversations non intelligibles, bruit relativement stationnaire, constitué d'un mélange de bruits de paroles. Enfin, les bruits de passages liés aux déplacements sur le plateau.

Même si cette classification n'est pas retenue dans toutes les études, des points de convergence des résultats sont à noter. En particulier, les bruits de parole associés aux conversations entre collègues ou au téléphone sont les bruits qui sont systématiquement considérés comme les plus gênants. Et parmi tous ces bruits de conversations, ce sont les conversations intelligibles qui sont considérées comme les plus gênantes par les salariés (figure 43). Dans certaines études, les bruits de sonneries de téléphones apparaissent aussi parmi les plus gênants. C'est par exemple le cas de l'étude de (Sundstrom et al., 1994) réalisée sur plus de 2000 salariés, incluant 58 sites d'entreprises, qui fait ressortir que 54% des personnes interrogées se disent gênées par le bruit, en particulier le bruit des paroles et le bruit des sonneries de téléphones. Dans une enquête beaucoup plus ancienne de (Boyce, 1974), ce sont les sonneries de téléphone qui arrivent en tête avec 67% de personnes qui se disent dérangées contre 55% par les conversations.

Figure 43
Contribution des sources de bruit à la gêne perçue par les salariés (enquête INRS 2014)



4. Nécessité d'une typologie d'open-space

La perception de l'environnement de travail dépend fortement, nous venons de le voir, du sentiment de privacité et notamment du sentiment de privacité sonore qui est conditionné par les

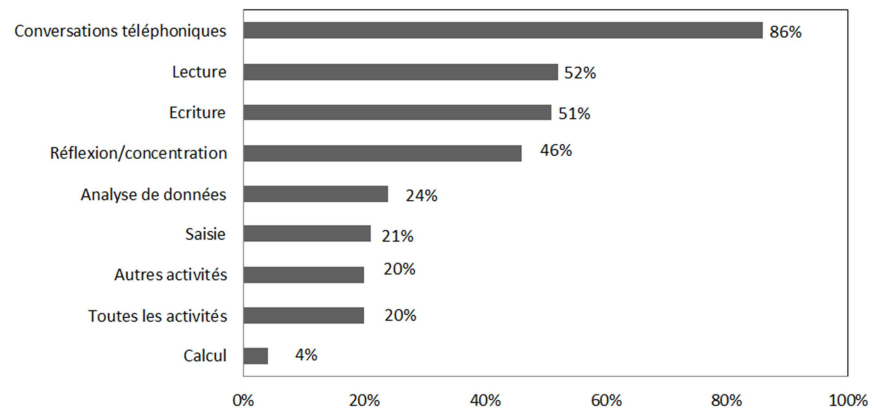
caractéristiques physiques des sources de bruit. Mais les sources ne sont pas les seuls facteurs de perturbation. Il faut aussi considérer tout un ensemble de facteurs environnementaux liés à l'aménagement, à l'activité ou à des éléments sociologiques qui viennent ajouter à la complexité de l'interprétation des résultats de terrain.

Le type de travail et les rapports sociaux entre les personnes peuvent jouer un rôle important dans la perception de l'environnement sonore. Dans l'enquête de (Sundstrom et al., 1982), 154 employés de bureaux, repartis selon 3 groupes bien distincts, des secrétaires, des agents comptables, des managers, ont décrit une perception de l'environnement bien différente. La variabilité interindividuelle est donc un élément important à prendre en considération dans les enquêtes en entreprise.

Plusieurs études se sont penchées sur les effets de la taille des bureaux. (Danielsson, 2005; Haapakangas et al., 2008) ont comparé différents arrangements de bureau et ont effectivement conclu que l'insatisfaction vis-à-vis du bruit et le manque de privacité étaient plus importants dans les grands espaces de travail que dans les bureaux individuels. (Becker et al., 1983) ont également montré que la performance était affectée par la taille de l'espace ouvert. (Pejtersen et al., 2006) ont établi un lien entre la taille des bureaux et la fatigue ou la difficulté à se concentrer. Dans une étude plus récente, (Pejtersen et al., 2011) ont montré que le nombre d'arrêts maladie était plus important dans les grands open-spaces.

L'activité des personnes est également un élément à prendre en considération, en particulier la tâche qui leur est demandée. En effet, la perception de la gêne n'est pas la même selon sa complexité. Par exemple, une tâche de saisie de données sur un tableur ne demande pas du tout les mêmes ressources cognitives qu'une discussion téléphonique avec un client très insatisfait d'un produit et qui souhaite des solutions immédiates. Il existe assez peu de données de terrain sur ce sujet. Cependant, l'étude de l'INRS (2014) montre une forte corrélation entre la gêne sonore et la possibilité de se concentrer pour réaliser une tâche demandée. Parmi toutes les activités pratiquées par les occupants des open-spaces, ce sont les conversations téléphoniques qui sont de très loin les plus gênées par le bruit ambiant (86 % sur la figure 44). Il est intéressant de constater ici que c'est l'interférence de deux processus cognitifs identiques (les conversations) qui est responsable de la plus forte gêne. Ceci va dans le sens des observations faites lors des expériences en laboratoire et confirme les résultats de (Haapakangas et al., 2008) qui montrent que ce sont les conversations et les tâches complexes de verbalisation qui arrivent en tête de la liste des tâches évaluées.

Figure 44
Gêne sonore ressentie lors
de la réalisation d'une
tâche (enquête INRS 2014)



Même si la prise en compte de l'ensemble de ces facteurs est très complexe, une avancée importante a été réalisée récemment grâce à la norme (NF-S31-199, 2016) qui définit une typologie d'open-space en fonction de l'activité, partant de l'hypothèse que d'une part l'environnement sonore est significativement différent d'un type à l'autre et que d'autre part, l'impact qu'il produit sur la perception est différent car l'activité, donc l'effort de concentration, est différente. Cette norme distingue 4 types d'open-spaces. Elle décrit les interactions entre les acteurs de l'espace de travail pour chaque cas, en déduit des caractéristiques de l'environnement sonore et propose des indicateurs acoustiques et des valeurs cibles/exigées.

4.1. Les centres d'appels

Les centres d'appels appelés encore centres de relation clients (CRC) ou centres de contact ou « call centers » (etc.) sont des espaces de bureaux ouverts dans lesquels diverses activités de type commercial, d'assistance technique, de renseignement, de démarchage, de sondages, de service après-vente, etc. peuvent avoir lieu. Mais, leur point commun est qu'elles sont réalisées essentiellement par téléphone.

Même si parfois, les opérateurs effectuent des tâches de bureautique, appelées « back-office », la majeure partie de leur temps est occupée à discuter au téléphone. En général, l'opérateur est affecté à des tâches relatives à des appels entrants (réponses à des questions de leurs interlocuteurs qui appellent) ou à des appels sortants (démarches commerciales en général, par exemple de prospect).

Du point de vue de l'organisation sur le plateau, on trouve essentiellement une organisation pyramidale en équipes avec la présence d'un superviseur qui encadre quelques opérateurs et parfois d'un hyperviseur lui-même encadrant plusieurs superviseurs donc plusieurs équipes. Souvent, les postes de travail sont partagés. A chaque instant, les personnes peuvent donc choisir un poste de travail qui n'est pas occupé, ce qui peut entraîner des mouvements, des déplacements imprévisibles sur le plateau.

L'activité dans un centre d'appels est différenciée, ce qui signifie que les personnes occupant l'espace peuvent être amenées à effectuer des tâches différentes, même si la principale d'entre-elles est l'usage du téléphone. Le travail est généralement non collaboratif.

Les sources de bruit sont nombreuses, réparties dans le local et composées principalement de conversations téléphoniques. Elles génèrent un niveau sonore ambiant (en général inférieur à 65 dB(A)) qui dépend de la densité d'occupation de l'espace et qui peut influencer sur l'effort vocal de chacun des collaborateurs (effet Lombard). Les communications verbales entre collaborateurs sur le plateau peuvent exister entre deux appels.

Les conversations avec le superviseur responsable hiérarchique et les collègues se font au poste de travail (courtes conversations) ou dans des locaux attenants à l'espace ouvert (conversations longues, formations, *etc.*) L'enjeu acoustique principal dans un centre d'appels est de garantir une bonne intelligibilité au poste de travail afin que la personne puisse converser à voix basse avec son interlocuteur sans être gênée par les autres conversations sur le plateau. La distance de privacité doit être réduite à une région proche du poste de travail.

4.2. Les plateaux collaboratifs

Ce type d'espace est aménagé pour un travail majoritairement collaboratif au sein d'équipes et de groupes de projet. L'espace ouvert abrite des personnes qui réalisent des tâches nécessitant une concentration limitée. Ce type d'espace est approprié pour des agences de publicité, des départements création/marketing, des bureaux d'études, *etc.*

L'activité y est différenciée et collaborative. Entre collaborateurs, la communication se fait principalement de vive voix, accessoirement au téléphone.

Le nombre de sources simultanées peut être relativement important et surtout le comportement vocal est fluctuant : ambiance vivante avec beaucoup d'interactions entre les personnes.

Les salariés de la même équipe doivent pouvoir communiquer aisément entre eux, sans importuner ceux qui se trouvent sur le même plateau mais dont l'activité est différente. Entre les personnes du même projet, on demande une bonne intelligibilité. Au-delà de l'équipe, l'aménagement doit être tel que les voix des personnes ne sont pas ou très peu perçues. L'enjeu acoustique principal est une bonne intelligibilité entre les personnes appartenant au même projet. Les conversations pouvant être faites de vive voix, il convient d'assurer une atténuation forte vers les personnes ne participant pas au projet. La distance de privacité se situe donc au niveau de l'équipe et non de l'individu.

4.3. Les espaces administratifs

Ce type d'espace est prévu pour un travail majoritairement individuel. Il est destiné à recevoir des métiers tels que l'administration, la comptabilité, les ressources humaines, les achats, *etc.* La concentration des collaborateurs y est en général soutenue. Leur activité est non différenciée et peu collaborative.

La tenue de discussions ne peut être envisagée (ou bien de façon tout à fait occasionnelle) dans ce type d'espace, tant pour ne pas déranger les collègues que pour des besoins de confidentialité (par exemple pour le personnel des ressources humaines recevant des candidats).

Le besoin de concentration au poste de travail est important car les tâches à réaliser sont en général exigeantes du point de vue cognitif. De ce fait, le niveau de bruit ambiant doit être faible pendant des durées importantes (plusieurs heures) et les émergences dues à des élévations de voix ponctuelles doivent être contrôlées. La distance de privacité doit être grande, bien au-delà des postes voisins, surtout lorsque des services différents sont implantés sur le même plateau. Lorsque les personnes d'un même plateau sont amenées à communiquer entre elles, il convient qu'elles se réunissent dans un espace aménagé à cet effet. Pour de très courtes conversations, le poste de travail doit être aménagé de telle manière que l'intelligibilité au poste de travail soit très bonne et que l'isolation acoustique vis-à-vis des postes voisins soit efficace.

4.4. Les halls d'accueil du public

Les halls d'accueil du public sont en général des plateaux sur lesquels coexistent des guichets ou des îlots de bureaux, réservés à des discussions privées entre le professionnel et un particulier avec une ou plusieurs salles d'attentes dans lesquelles des dizaines de personnes peuvent patienter tout en conversant ou s'occupant à d'autres activités. Typiquement, il s'agit de halls de gare (figure 45), de boutiques à l'intérieur des centres commerciaux (figure 46), de mairies (photo de la figure 47), d'assurances, de banques, de centres d'accueil médicaux, *etc.*

Dans l'idéal, tout doit être mis en œuvre pour favoriser les discussions entre le personnel et les particuliers avec une forte confidentialité des conversations. Ceci va dans le sens d'une faible collaboration entre les membres du personnel. Entre deux rendez-vous, ils doivent pouvoir s'isoler pour accomplir des tâches qui nécessitent une forte concentration comme la saisie d'informations confidentielles ou la rédaction de documents.

Sur le terrain, on note une forte disparité des environnements de travail appartenant à cette catégorie. Dans les grands halls de gare qui sont très souvent localisés dans au sein d'ouvrages remarquables d'un point de vue architectural, en pierre, fréquemment classés monuments historiques, les temps de réverbération sont élevés et les décroissances faibles. A contrario, dans certaines petites boutiques de téléphonie dans les centres villes, une attention particulière a été apportée aux matériaux acoustiques afin de diminuer les effets de réverbération. Souvent, les niveaux de bruit ainsi que les fluctuations de ces niveaux sont supérieurs à ceux des autres types d'espaces ouverts, simplement parce que le nombre de personnes présentes est plus élevé et que les discussions y sont plus vives. Les valeurs mesurées par l'INRS pour cette catégorie d'open-space sont plus dispersées que pour les autres types avec des niveaux pouvant atteindre pratiquement 65 dB(A) et des fluctuations de l'ordre de 15 dB(A). La gêne ressentie par les personnes sur ces plateaux couvre toute l'échelle de variation.

Figure 45

Espace de vente SNCF dans la gare de Montpellier. Au premier plan, la salle d'attente ; des guichets au centre de la pièce. Le plafond est traité par des matériaux acoustiques.



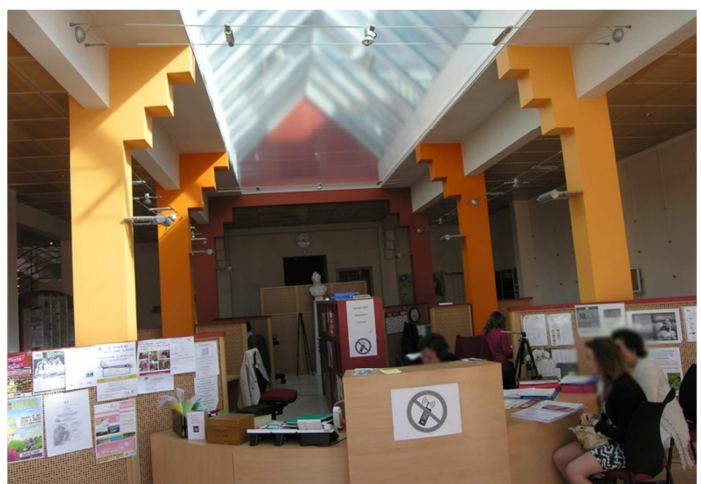
Figure 46

Espace de vente Orange dans la galerie marchande d'un centre commercial. Les occupants subissent en permanence le bruit provenant de la galerie (bruits de passages et musique).



Figure 47

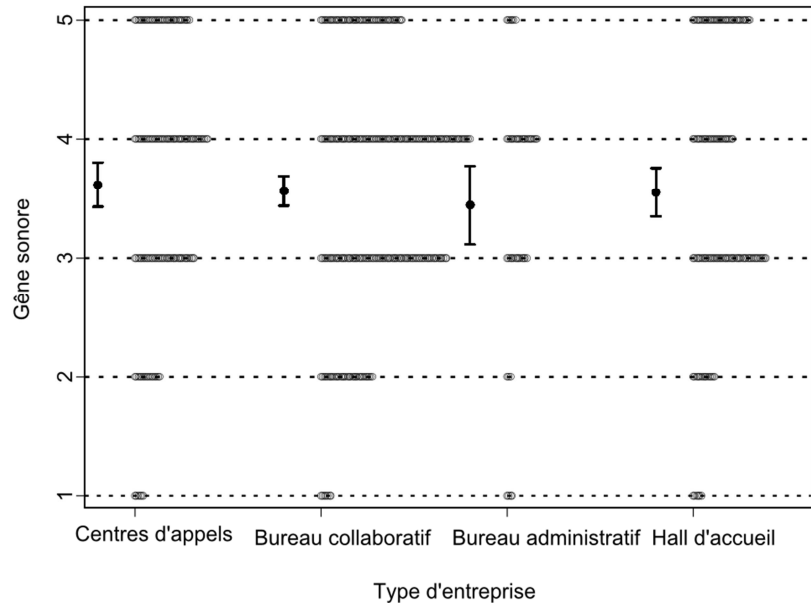
Hall d'accueil de la mairie de Chalette sur Loing.



4.5. Effets du type d'open-space

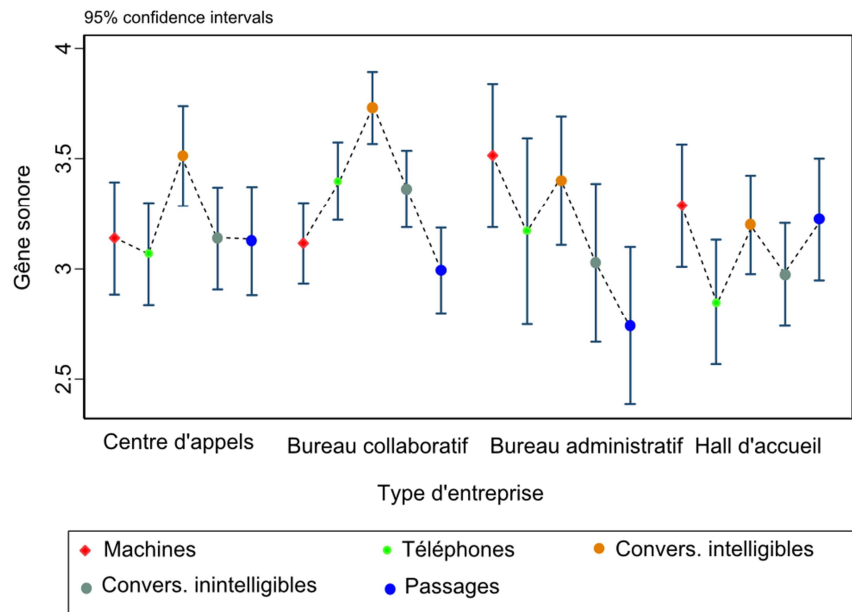
L'enquête INRS 2014 a permis de mettre en évidence des résultats nouveaux portant sur les différences de perception selon le type d'open-space. Le premier résultat est que le degré de perception de la gêne sonore est identique dans tous les open-spaces (figure 48) : la valeur de gêne est de l'ordre 3,5 sur 5 qui représente une valeur modérée voire élevée. Il n'y a donc pas de raison de favoriser a priori une action de prévention sur un type de plateau plutôt que sur un autre.

Figure 48
Perception de la gêne sonore
en fonction de l'open-space
(enquête INRS 2014)



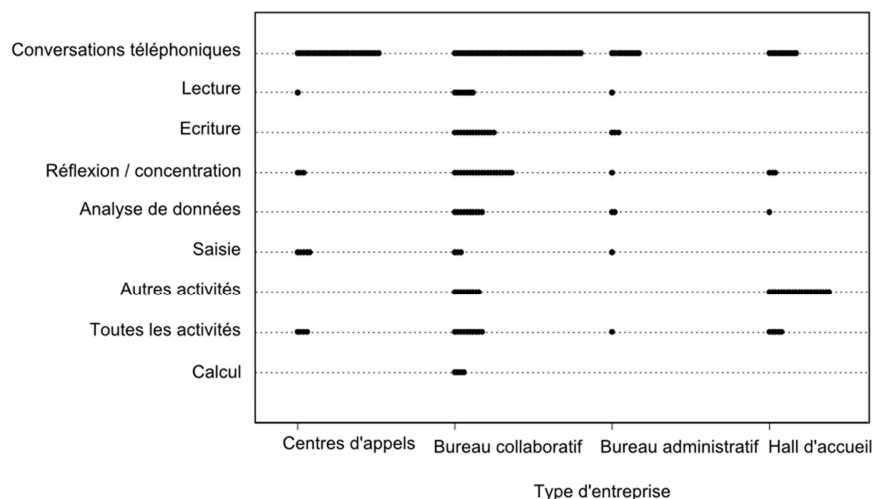
Cependant, les sources sonores ne sont pas toutes perçues avec la même intensité dans tous les plateaux (figure 49). La hiérarchisation des sources sur les centres d'appels et les plateaux collaboratifs est assez similaire : ce sont les conversations intelligibles qui sont perçues comme les plus gênantes. Pour les bureaux administratifs, les bruits des machines (équipements liés à la bureautique) se placent dans le peloton de tête. Dans les halls d'accueil du public, il n'y a pas vraiment de hiérarchisation des sources. Ceci s'explique certainement par la grande disparité des configurations et par la complexité de l'activité qui s'y exerce. Sur l'ensemble des plateaux, les sonneries de téléphones ne sont pas perçues comme particulièrement gênantes.

Figure 49
Hiérarchisation
(moyenne et intervalle
de confiance) des
sources de bruit en
fonction du type d'open-
space (enquête INRS
2014)



Un autre résultat intéressant de l'enquête est que les conversations téléphoniques sont les activités les plus gênées sur tous les plateaux, sauf pour les halls d'accueil où ce sont les discussions avec les clients (classées dans « Autres activités » sur la figure 50). Dans tous les cas, ce sont les tâches de verbalisation qui sont donc les plus perturbées, confirmant les interférences entre les processus cognitifs similaires. Pour le plateau collaboratif, les activités de concentration sont gênées par le bruit. Effectivement, ce type de tâche est a priori incompatible avec l'activité vive qui règne sur les plateaux très collaboratifs.

Figure 50
Répartition de l'effet du
bruit sur les tâches par
type d'entreprise
(enquête INRS 2014)



La conclusion de ce chapitre est qu'en matière d'analyse de terrain, tout reste à faire. Pourtant, de nombreuses enquêtes ont été réalisées en Europe et aux Etats-Unis avec souvent des points de convergence sur les facteurs principaux de l'insatisfaction et sur l'identification des principales sources de bruit. Mais l'open-space n'est pas « un objet » qui se caractérise par des dimensions physiques uniquement. Il est comme un organisme vivant qui s'anime différemment selon la fonction qui lui est

assignée. C'est pourquoi, il est nécessaire aujourd'hui de poursuivre la voie initiée par la norme (NF-S31-199, 2016) visant à établir une typologie d'open-space en fonction de l'activité. Il reste maintenant à compléter les observations et les bases de données pour chaque type d'open-space avec comme objectif de proposer des solutions acceptables différenciées.

Références bibliographiques

- Ayr, U., E. Cirillo and F. Martellotta (2001). "An experimental study on noise indices in air conditioned offices." Applied Acoustics **62**(6): 633-643.
- Banbury, S. and D. C. Berry (1997). "Habituation and dishabituation to speech and office noise." Journal of Experimental Psychology: Applied **3**(3): 181.
- Becker, F. D., B. Gield, K. Gaylin and S. Sayer (1983). "Office design in a community college effect on work and communication patterns." Environment and Behavior **15**(6): 699-726.
- Boyce, P. (1974). "Users' assessments of a landscaped office." Journal of Architectural Research: 44-62.
- Danielsson, C. (2005). "Office environment, health and job satisfaction: an explorative study of office design's influence."
- De Croon, E., J. Sluiter, P. P. Kuijer and M. Frings-Dresen (2005). "The effect of office concepts on worker health and performance: a systematic review of the literature." Ergonomics **48**(2): 119-134.
- Evans, G. W. and D. Johnson (2000). "Stress and open-office noise." Journal of applied psychology **85**(5): 779.
- Grosjean, V., J. L. Kop, N. Formet-Robert and C. Parmentier (2007). SATIN. Un questionnaire d'évaluation de la santé au travail pour la prévention, le diagnostic et l'intervention. Manuel d'utilisation. Note scientifique et technique, NS 272. INRS.
- Haapakangas, A., R. Helenius, E. Keskinen and V. Hongisto (2008). Perceived acoustic environment, work performance and well-being—survey results from Finnish offices. Proceedings of 9th International Congress on Noise as a Public Health Problem (ICBEN).
- Huang, Y.-H., M. M. Robertson and K.-I. Chang (2004). "The role of environmental control on environmental satisfaction, communication, and psychological stress effects of office ergonomics training." Environment and Behavior **36**(5): 617-637.
- Jensen, K. and E. Arens (2005). Acoustical quality in office workstations, as assessed by occupant surveys.
- Kaarlela-Tuomaala, A., R. Helenius, E. Keskinen and V. Hongisto (2009). "Effects of acoustic environment on work in private office rooms and open-plan offices—longitudinal study during relocation." Ergonomics **52**(11): 1423-1444.
- Kupritz, V. (2001). "Aging worker perceptions about design and privacy needs for work." Journal of Architectural and Planning Research: 13-22.

- Kupritz, V. (2003). "Accommodating privacy to facilitate new ways of working." Journal of Architectural and Planning Research: 122-135.
- Lee, S. Y. and J. Brand (2010). "Can personal control over the physical environment ease distractions in office workplaces?" Ergonomics **53**(3): 324-335.
- Loewen, L. J. and P. Suedfeld (1992). "Cognitive and arousal effects of masking office noise." Environment and Behavior **24**(3): 381-395.
- NF-S31-199 (2016). Acoustique - Performances acoustiques des espaces ouverts de bureaux
- Pejtersen, J., L. Allermann, T. S. Kristensen and O. M. Poulsen (2006). "Indoor climate, psychosocial work environment and symptoms in open-plan offices." Indoor Air **16**(5): 392-401.
- Pejtersen, J. H., H. Feveile, K. B. Christensen and H. Burr (2011). "Sickness absence associated with shared and open-plan offices—a national cross sectional questionnaire survey." Scandinavian Journal of Work, Environment & Health: 376-382.
- Perrin Jegen, N. and P. Chevret (2016). "Effect of noise on comfort in open-plan offices: application of an assessment questionnaire." Ergonomics: 1-12.
- Pierrette, M., E. Parizet, P. Chevret and J. Chatillon (2014). "Noise effect on comfort in open-space offices: development of an assessment questionnaire." Ergonomics **58**(1): 96-106.
- Sailer, U. and M. Hassenzahl (2000). "Assessing noise annoyance: an improvement-oriented approach." Ergonomics **43**(11): 1920-1938.
- SBiB (2010). Enquête Suisse dans les bureaux,. Technique & architecture, Haute Ecole de Lucerne 159.
- Schutte, M., A. Marks, E. Wenning and B. Griefahn (2007). "The development of the noise sensitivity questionnaire." Noise and Health **9**(34): 15.
- Sundstrom, E., R. K. Herbert and D. W. Brown (1982). "Privacy and Communication in an Open-Plan Office: A Case Study." Environment and Behavior **14**(3): 379-392.
- Sundstrom, E., J. P. Town, D. W. Brown, A. Forman and C. Mcgee (1982). "Physical enclosure, type of job, and privacy in the office." Environment and Behavior **14**(5): 543-559.
- Sundstrom, E., J. P. Town, R. W. Rice, D. P. Osborn and M. Brill (1994). "Office Noise, Satisfaction, and Performance." Environment and Behavior **26**(2): 195-222.
- Veitch, J. A. (1990). "Office noise and illumination effects on reading comprehension." Journal of Environmental Psychology **10**(3): 209-217.
- Weinstein, N. D. (1978). "Individual differences in reactions to noise: a longitudinal study in a college dormitory." Journal of applied psychology **63**(4): 458.
- Zimmer, K. and W. Ellermeier (1999). "Psychometric properties of four measures of noise sensitivity: A comparison." Journal of Environmental Psychology **19**(3): 295-302.

Chapitre 4

Projet pour l'amélioration de l'ambiance sonore dans les open-spaces

Nous avons présenté jusqu'ici une synthèse de l'état des connaissances sur le bruit dans les open-spaces en essayant d'éclairer séparément celles qui concernent l'acoustique physique, objective, et celles relatives à la perception subjective. Nous avons également pointé les principaux travaux de recherche en cours, notamment ceux que nous avons initiés depuis quelques années.

A chaque fois que nécessaire, nous avons souligné les limitations des approches, leurs incertitudes au regard des enjeux pour la protection des salariés. Dans cette dernière partie, nous proposons de regrouper au sein d'un même projet pour les prochaines années, les principales actions que nous envisageons de conduire pour faire progresser la lutte contre les nuisances sonores dans les open-spaces.

1. Apporter les connaissances et les outils aux préventeurs en entreprise

L'amélioration des conditions sonores dans les open-spaces se joue avant tout sur le terrain grâce au travail des préventeurs en entreprises. Ces personnes, ergonomes, médecins du travail ou appartenant au Centre de Mesures Physiques du réseau de prévention de la CNAM-TS, sont, en

général, en charge de multiples actions dans l'entreprise qui dépassent largement la problématique du bruit. Il convient donc de favoriser à ces professionnels l'accessibilité des connaissances et des outils. C'est dans cet esprit que le laboratoire d'acoustique de l'INRS a conçu le logiciel de prévision sonore Rayplus dans les années 1980. Initialement, l'outil a été développé pour les applications industrielles si bien que les résultats sont en conformité avec les normes du domaine (niveaux de bruit, T_r Sabine ou Eyring, décroissance linéaire selon la norme (ISO-14257, 2002)). Pour les applications du secteur tertiaire, il est nécessaire de le faire évoluer en intégrant les indicateurs adéquats tels que la directivité des sources, la décroissance spatiale entre les postes, l'intelligibilité, ou l'exposition aux bruits de parole dont nous parlerons ultérieurement. Un projet sur quatre ans est en cours de réalisation à l'INRS pour la mise à jour du logiciel (2015 - 2018). Mon implication sur le projet est totale avec pour objectif de fournir *in fine* aux préventeurs un outil intuitif qui leur permettra de faire de la prédiction en vue d'aménagement ou de rénovation des espaces de travail.

En complément du logiciel de prévision, un système de mesures, également dédié aux open-spaces est en cours de développement. Ce système doit permettre de faciliter les mesures d'indicateurs selon la norme (NF-S31-199, 2016). C'est grâce à deux stagiaires de master (Weber, 2014; Yanglou, 2015) que j'ai encadrés avec l'aide de Julien Marchand (INRS) qu'un premier prototype est sorti en 2015. Un algorithme de suppression du bruit de fond, basé sur l'utilisation de séquences MLS, est en cours de développement. Cet algorithme devrait permettre de réaliser les mesures en présence de personnes dans le local de travail. Le système est actuellement en test à l'INRS et doit être déployé en entreprise dans le courant de l'année 2017.

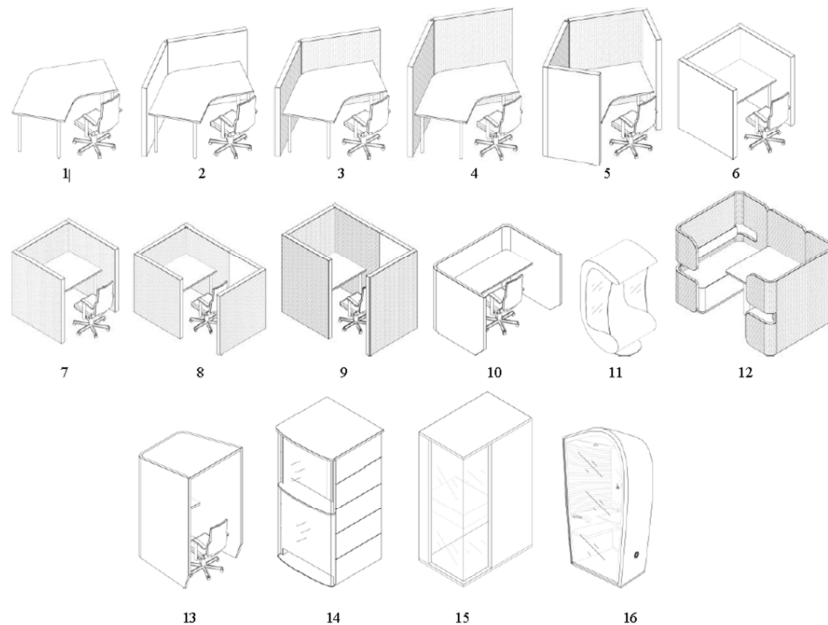
Un autre volet de la prévention concerne l'édition de recommandations et la préconisation de solutions. Les recommandations sont en général données par des normes, à la rédaction desquelles l'INRS participe activement lorsqu'il s'agit de sécurité et de santé au travail. Depuis mon arrivée à l'INRS en 2009, je suis fortement impliqué dans les travaux de la commission S30D (« Acoustique sur les lieux de travail ») de l'AFNOR dont le principal objectif était, jusqu'en mars 2016, la rédaction de la norme NF S 31-199 sur les espaces de bureaux ouverts. Cette norme sert aujourd'hui de référence en France car elle propose non seulement des indicateurs acoustiques et des valeurs cibles, valeurs qui ont été définies en partie grâce aux essais en laboratoire et aux mesures de terrains réalisés par l'INRS, mais également des outils pour l'aide à la caractérisation des gênes perçues, tels que le questionnaire GABO ou des synopsis indiquant les démarches d'aménagement ou de rénovation des espaces.

Aujourd'hui, le principal enjeu au niveau de la normalisation est de faire accepter les grands principes de la norme française au niveau international. Je compte m'impliquer fortement dans ce nouveau projet qui devrait débuter en 2017 pour une durée de 3 ou 4 ans.

Compte-tenu des enjeux commerciaux liés au développement des open-spaces au niveau international, il apparaît chaque jour de nouvelles solutions plus ou moins innovantes, plus ou moins pertinentes, qui doivent être validées avant d'être proposées aux entreprises.

Ces évolutions portent à la fois sur l'aménagement, sur l'organisation et sur le contrôle de l'environnement physique. Concernant l'aménagement, c'est souvent au niveau des éléments de mobilier que se situent les innovations. Il est impossible d'être exhaustif tant les industriels ont des ressources en matière de créativité. On peut citer néanmoins l'apport d'éléments absorbants suspendus de toutes formes au-dessus des postes de travail, l'intégration de l'éclairage par des diodes électroluminescentes (led) dans les panneaux acoustiques, l'apparition d'éléments de mobilier qui cloisonnent plus ou moins le salarié (figure 51).

Figure 51
Extrait de l'étude de
(Hongisto et al., 2016)
portant sur le
développement d'un
nouvel indicateur
d'atténuation du son par
des éléments de mobilier.



Concernant le contrôle de l'environnement physique et notamment celui de l'environnement sonore, le marché industriel s'ouvre depuis quelques décennies dans les pays anglo-saxons aux systèmes de masquage. L'idée est d'ajouter au bruit ambiant un bruit, contrôlé en niveau et en spectre, permettant de réduire l'intelligibilité au poste de travail, donc a priori, de diminuer les perturbations cognitives. Il existe aujourd'hui des systèmes commerciaux relativement sophistiqués qui sont dit adaptatifs dans la mesure où les niveaux émis pour masquer les bruits gênants s'adaptent automatiquement à ces derniers, y compris en fonction des bandes de fréquences (Goubran and Botros, 2003). Les types de masquage les plus fréquemment rencontrés sur le terrain sont le bruit blanc ou rose pondéré A, le bruit associé à un paysage particulier (forêt, rivière), la musique. Le problème est que l'impact réel de ces systèmes sur les occupants est encore insuffisamment évalué et les résultats de plusieurs études récentes réalisées en Finlande (Veitch et al., 2002; Haapakangas et al., 2011; Hongisto et al., 2015) démontrent qu'il est très difficile à ce jour de spécifier un niveau et un spectre pour le bruit de masquage. (Hongisto et al., 2015) rapporte par exemple que 25 % des personnes interrogées disent ne pas être satisfaites de l'ambiance sonore en présence du système de masquage recommandé par les récents guides acoustiques pour les open-spaces finlandais issus des travaux de (Veitch et al., 2002). Il faut ajouter que les études citées portent sur des niveaux sonores de l'ordre de 45 dB(A), qui est un niveau relativement faible pour le parc des bureaux ouverts français. Il n'est pas certain qu'ajouter un bruit de masquage à des niveaux plus élevés (entre 50 et 55 dB(A)) produise la même

sensation in fine... d'ailleurs certains fournisseurs ne le proposent qu'en dessous de 48 dB(A) conformément à la recommandation de l'US Green Buildings Council, <http://www.usgbc.org/credits/reqpc24r1-1>).

Le rôle de l'INRS sur le terrain de l'innovation pour les open-spaces est d'émettre un avis d'expert indépendant sur les solutions nouvelles proposées aux entreprises et de faciliter aux utilisateurs de bureaux l'accès à celles qui sont les plus pertinentes en matière de santé et de sécurité au travail. C'est dans cet esprit que se déroulent mes actions de veille et de conseil auprès des différents acteurs cités précédemment.

2. Compléter les tests en laboratoire

L'intérêt des tests en laboratoire est de permettre l'analyse des perturbations cognitives liées à certains facteurs, comme les facteurs physiques du bruit, tout en gardant le contrôle d'autres paramètres. Par exemple, pour évaluer les effets du niveau sonore sur la baisse de performance, lors de la réalisation d'une tâche de mémoire sérielle, le laboratoire est l'endroit idéal. Par contre, pour répondre directement à la question posée par les acteurs de terrain, c'est-à-dire l'évaluation des effets du bruit en open-space sur les fonctions cognitives, le passage en laboratoire nécessite encore :

1. de préciser la variable d'observation (baisse de performance, charge cognitive, gêne, bien-être, satisfaction, fatigue, stress, etc.). Ce point implique également de se poser la question de la durée des tests,
2. de définir la tâche que doivent réaliser les sujets. Nous l'avons vu, il est très difficile de définir une tâche qui soit représentative de l'environnement réel (validité écologique). C'est pourquoi, les tests se ramènent très souvent à des tests de mémoire sérielle,
3. de mettre en œuvre les conditions sonores qui soient les plus représentatives de l'environnement de travail,
4. et tout aussi important, de mettre en place des évaluations subjectives permettant de contrôler la sensibilité individuelle des sujets puisqu'il a été constaté a posteriori, notamment dans nos précédentes études, qu'il existe une très grande variabilité interindividuelle.

De la bonne appréhension de ces quatre points, dépend la qualité des expériences. Il existe aujourd'hui une trop grande dispersion entre les résultats des différentes études, ce qui nous interroge sur la pertinence du modèle de Hongisto présenté dans le chapitre 2 et, in fine, sur les recommandations des normes quant à la distance de privacité. C'est pour répondre à ces questions, qu'une étude INRS a été lancée en 2015 avec la collaboration du Laboratoire Vibrations et Acoustique de l'INSA de Lyon et du Département de Psychologie Cognitive et Expérimentale de l'Université Aix-Marseille. J'ai la responsabilité de cette étude et j'assure le co-encadrement d'un doctorant en acoustique, dirigé par Etienne Parizet (Prof), ainsi que l'encadrement d'un post-doctorant en psychologie, suivi également par Edith Galy (Prof.). Deux phases sont prévues pour ce projet : la première se déroulera sur la période fin 2016 - début 2017 et vise à travailler particulièrement sur le choix des tâches, les conditions sonores et la variabilité interindividuelle (points 2 à 4 cités

précédemment), la seconde, prévue en fin 2017 dont l'objectif principal est de travailler sur la variable d'observation et la durée des tests (point 1).

La première campagne de tests prévoit, pour ce qui concerne l'évaluation subjective, de s'appuyer sur le questionnaire NASA-TLX (Hart and Staveland, 1988) pour la charge cognitive, sur le questionnaire de Thayer (Thayer, 1978), pour la vigilance et la fatigue, et sur des échelles visuelles analogiques (EVA) pour la gêne vis-à-vis du bruit, comme l'a fait (Schlittmeier et al., 2008) en demandant aux sujets de répondre à la question « Avez-vous été perturbé par le bruit ? ». Il est donc à noter que, dès cette première expérience, plusieurs grandeurs subjectives seront scrutées même si ce n'est pas l'objectif principal ; la durée des tests est relativement courte, de l'ordre d'une heure, ce qui ne permettra pas, a priori, de tirer des informations significatives sur la fatigue perçue. La tâche à réaliser par les sujets sera une tâche de mémoire catégorielle (rappel de listes de mots, plus ou moins longue, appartenant à différentes catégories) qui sollicite la mémoire de travail. C'est effectivement la mémoire de travail qui est choisie car c'est elle qui est le plus souvent utilisée lors des activités de bureau et l'utilisation de mots permet de favoriser les interférences entre les flux de paroles intelligibles et les mots à rappeler. Les conditions sonores doivent être en cohérence avec le contexte et les constituants physiques du bruit dont on cherche à évaluer les effets. Notre hypothèse est que ce sont les amplitudes de modulation du signal de parole qui favorisent l'intelligibilité et donc la gêne ressentie. On cherchera donc à reconstituer des ambiances sonores d'open-spaces avec un contenu de paroles plus ou moins intelligible. Le descripteur physique des ambiances pourra être soit un indice d'intelligibilité de type *STI*, soit un indice d'émergence de la parole de type M_{Aeq} . Toute la plage de variation de ces indices sera couverte. Afin d'avoir un meilleur contrôle des résultats vis-à-vis de la variabilité interindividuelle, des tests complémentaires seront effectués pour chaque sujet : contrôle de son audition avec un test d'audiométrie, vérification de son empan mnésique à partir du WAIS (échelle d'évaluation de l'intelligence adulte, de Wechsler), vérification de ses capacités d'inhibition des processus automatiques à l'aide du test de Stroop, test de *Locus of Control* au moyen du test de Levenson (Levenson, 1974).

Pour la seconde expérience en laboratoire, l'accent sera mis sur la variable d'observation, sur la durée de l'expérience donc implicitement sur la question de la validité écologique du laboratoire. La plupart des expériences partent du principe que la baisse de performance est un bon descripteur de l'ISE, tout comme la gêne perçue. Cependant, les effets constatés sont assez faibles et parfois non significatifs. Nous conjecturons que la principale raison est la courte durée des tests qui ne permet pas de mettre en évidence des effets de doses, susceptibles d'engendrer non pas de la gêne mais de la fatigue. Plusieurs études se sont déjà penchées sur ce problème. Par exemple, (Witterseh et al., 2004) ont reproduit en laboratoire un environnement de travail en open-space en contrôlant, sur une durée de 3 heures, la température et l'ambiance sonore, en faisant exécuter différentes tâches aux sujets, en leur autorisant à faire quelques exercices et à prendre l'air de temps à l'autre. Sur la base de questionnaires, les auteurs ont noté une augmentation significative de la fatigue perçue par les sujets. (Liebl et al., 2012) et ils ont aussi obtenu une baisse de performance pour certaines tâches, en particulier les tâches sollicitant la mémoire court terme, ainsi qu'une diminution de la satisfaction

(bien-être) en présence de bruit fortement intelligible après une exposition d'une durée de 7 heures. Sur la même durée d'une journée, (Lund et al., 2012) n'ont pas noté d'effet de la durée sur la fatigue mentale pour l'ensemble des participants mais ont obtenu un effet significatif pour les personnes qui se sont dites gênées par le bruit. A noter que la fatigue mentale a été évaluée au moyen de tests d'attention soutenue (SART) et non de façon subjective. De même (Toftum et al., 2012) ont obtenu une augmentation de la fatigue et de « l'état mental » en s'appuyant sur plusieurs questionnaires pour une durée d'exposition de l'ordre d'une journée.

Ses études révèlent qu'il y a deux défis majeurs à relever pour la mise en place d'expériences de longue durée en laboratoire. Le premier est de définir clairement la variable d'observation et les outils permettant son évaluation. La fatigue semble un bon candidat, encore faut-il la définir clairement. La fatigue est un phénomène objectif (physiologique) et subjectif (psychologique), multifactoriel, qui se manifeste par une diminution des capacités (physiques et intellectuelles) de l'individu. Elle apparaît comme un phénomène périodique et prévisible qui influence les performances psycho-physiologiques (temps de réaction, vitesse de calcul mental, test de coordination, exécution de tâches complexes) et/ou des processus subjectifs (quantifiés à l'aide d'échelles visuelles analogiques). On dispose donc d'outils objectifs comme les tests d'attention soutenu ou subjectifs tels que les questionnaires. L'enjeu sera de sélectionner les plus pertinents. Le second défi concerne la représentativité écologique des mesures en laboratoire. Cette représentativité doit être envisagée du point de vue de l'environnement physique : le contrôle du niveau sonore, de la température, d'autres facteurs physiques éventuellement. Et du point de vue de l'activité : la durée des tests, les tâches à réaliser, les pauses à respecter, etc. Pour cela, il faudra s'appuyer sur des données de terrain, que ce soient des mesures physiques ou des observations.

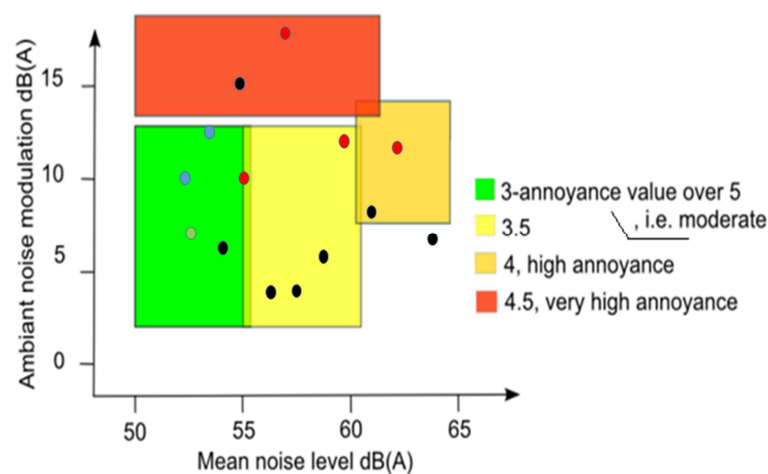
3. Multiplier les interventions de terrain

Le terme d'open-space désigne finalement un concept plus qu'un type de bureau, qui a comme principe vertueux de permettre la réalisation de tâches prescrites tout en favorisant les échanges entre les personnes dans le respect de la sphère individuelle de chacun. Un vœu pieu ? Le retour d'expérience de nos interventions fait le constat que les open-spaces du type de celui de la figure 38 sont beaucoup plus rares que ceux qui se préoccupent davantage du taux de remplissage que de la satisfaction au travail. Néanmoins, il existe une gradualité de la qualité de l'environnement de travail en open-space et, surtout, on ne peut pas réduire le concept d'open-space à un seul type. Les experts français qui ont participé à la rédaction de la norme NF S 31-199, 2016 l'ont bien senti puisqu'ils ont mis en place pour la première fois une typologie basée sur l'activité et, par déclinaison, sur la communication verbale entre les personnes. C'est grâce à des enquêtes de terrain et des mesures physiques du bruit que ce travail a pu être réalisé. Mais il faut poursuivre les investigations et cela nécessite des compétences dans les domaines de la physique, de l'ergonomie et de la psychologie. Cela nécessite également d'aller sur le terrain, de mesurer, d'observer les personnes, de s'entretenir avec elles. C'est le projet que nous avons formulé à l'INRS au début des années 2000 et qui se poursuit aujourd'hui avec la collaboration des acousticiens, des ergonomes, des psychologues et des médecins du travail de grandes entreprises françaises. Ces collaborations ont déjà apporté des

éléments nouveaux utiles pour la normalisation, pour les préventeurs dans les entreprises et pour la recherche, notamment grâce à deux projets financés par l'ANSES. Ces projets, l'un en collaboration avec l'INSA de Lyon (GABO), le second avec le CSTB (MEPAS) ont permis de recueillir des informations sur l'acoustique et la satisfaction des personnes au sein de 25 open-spaces français. Une première cartographie de la situation actuelle a été faite avec une mise en relation entre les niveaux de bruit et ses fluctuations et la perception de la gêne sonore (figure 52). Cette cartographie est encore très imprécise car l'échantillonnage est insuffisant. Son principal mérite à ce jour est de creuser le sillon amorcé par le docteur Wisner dans les années 1970. Ceci ne pourra se faire qu'en multipliant les actions en entreprise, en s'appuyant sur le réseau prévention de l'assurance maladie et sur la bonne volonté des entreprises.

Figure 52

Gêne sonore ressentie en fonction du niveau de bruit ambiant et des fluctuations de niveaux pour les différents type d'open-space (Le Muet and Chevret, 2016). Les points représentent quatorze open-space pour lesquels à la fois des mesures physiques et des données subjectives sont disponibles.

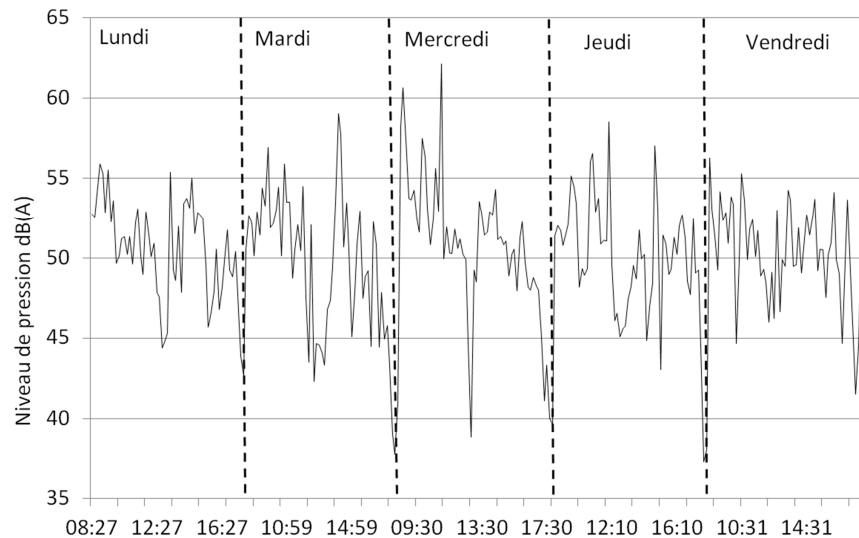


Toutes les enquêtes réalisées jusqu'ici ne nous renseignent qu'à une échelle macroscopique, elles ne disent rien des effets du bruit sur la charge cognitive à l'échelle d'une journée ou d'une semaine. Ces informations sont pourtant essentielles puisqu'elles permettent de mieux comprendre, sur le terrain, les mécanismes impliqués dans l'ISE. Depuis environ une année, l'INRS a entamé, avec le soutien de psychologues et d'ergonomes, une campagne d'observations et d'enquêtes auprès d'entreprises de la téléphonie et de la banque. L'objectif est de suivre dans leur milieu, pendant une semaine ou deux, les personnes soumises aux nuisances sonores des open-spaces. En parallèle, des mesures de niveau de bruit en continu pendant la durée d'observation sont aussi réalisées (figure 53), ainsi que des entretiens individuels et des enquêtes collectives. La grandeur qui est analysée au travers de ces suivis est la fatigue ressentie. Pour cela, plusieurs types de questionnaires sont déployés. Le MFI (Gentile et al., 2003), par exemple, est composé de 20 affirmations/déclarations pour lesquels les sujets expriment leur niveau d'accord à l'aide d'une échelle en 5 points variant « Pas du tout d'accord » à « Énormément d'accord ». La validation du MFI a révélé quatre sous-échelles :

- (i) La « fatigue générale » qui correspond à des déclarations d'ordre général concernant l'état fonctionnel de l'individu tel que « je me sens reposé »,

- (ii) La « fatigue mentale » qui se réfère à la sensation de fatigue. Des symptômes cognitifs tels que des difficultés de concentration sont inclus dans ce facteur,
- (iii) Les « activités réduites » qui incluent une réduction subjective des capacités à amorcer de nouvelles activités,
- (iv) La « Motivation » qui évalue la motivation pour démarrer une activité.

Figure 53
Mesure du niveau de bruit ambiant dans un open-space de type administratif pendant une semaine complète



Dans le domaine de l'évaluation de la somnolence, une des échelles subjectives les plus utilisées, encore à l'heure actuelle, est le KSS (Karolinska Sleepiness Scale). Elle a été développée par (Åkerstedt and Gillberg, 1990). Les réponses à l'échelle d'évaluation subjective KSS sont corrélées aux augmentations énergétiques des spectres Alpha et Thêta des ondes cérébrales. Les scores à l'échelle d'évaluation subjective KSS, comme les puissances énergétiques des spectres Alpha et Thêta, augmentent avec la durée de l'épreuve. La checklist de Thayer, dont nous avons parlé précédemment, et l'échelle visuelle analogique, dont l'intérêt est de pouvoir suivre facilement les évolutions et les fluctuations de l'éveil au cours du temps, sont d'autres moyens utilisés pour suivre la fatigue sur la durée de la journée et de la semaine. Corrélées avec les données de bruit recueillies sur la même durée (figure 53), ces informations devraient nous permettre d'en observer les effets sur la fatigue.

4. Réaliser un système d'évaluation de l'exposition aux bruits de parole

Le seul levier réglementaire dont dispose le salarié exposé au bruit dans l'entreprise est le décret n° 2006-892 du 19 juillet 2006 relatif aux prescriptions de sécurité et de santé. Ce décret donne les paramètres physiques utilisés comme indicateurs du risque ainsi que les obligations des employeurs

en cas de dépassement des seuils. En particulier, la valeur inférieure d'intervention pour l'exposition sonore est de 80 dB(A).

Il est clair que dans le secteur tertiaire et en particulier dans les open-spaces, ce niveau d'exposition n'est jamais atteint. Pourtant sur la base de toutes les études scientifiques que nous avons citées dans ce document, on ne peut nier que le bruit dans l'open-space soit responsable d'un mal être au travail qui risquera de déboucher sur un arrêt maladie à plus ou moins long terme. Il y a donc aujourd'hui une nécessité de mettre en œuvre une méthodologie d'évaluation de l'exposition au bruit de parole. Cette méthodologie doit inclure un indicateur simple de l'exposition, un protocole de mesurage et la définition d'un système opérationnel en entreprise. Toutes les recherches que nous avons réalisées avec le LVA de l'INSA de Lyon depuis quelques années et plus récemment avec le Laboratoire Psycole de l'université Aix-Marseille peuvent être capitalisées pour le développement d'un tel système. Il est prévu que la collaboration se poursuive entre les trois partenaires sous réserve de financements. Il est temps que l'open-space passe du monde virtuel imaginé par les architectes et des aménageurs à la réalité d'un lieu de travail vertueux pour les salariés.

Références bibliographiques

- Åkerstedt, T. and M. Gillberg (1990). "Subjective and objective sleepiness in the active individual." International Journal of Neuroscience **52**(1-2): 29-37.
- Gentile, S., J. Delaroziere, F. Favre, R. Sambuc and J. San Marco (2003). "Validation of the French 'multidimensional fatigue inventory'(MFI 20)." European journal of cancer care **12**(1): 58-64.
- Goubran, R. and R. Botros (2003). Adaptive sound masking system and method, US Patent 20,030,103,632.
- Haapakangas, A., E. Kankkunen, V. Hongisto, P. Virjonen, D. Oliva and E. Keskinen (2011). "Effects of five speech masking sounds on performance and acoustic satisfaction. Implications for open-plan offices." Acta Acustica united with Acustica **97**(4): 641-655.
- Hart, S. G. and L. E. Staveland (1988). "Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of empirical and theoretical research." Advances in psychology **52**: 139-183.
- Hongisto, V., J. Keränen, P. Virjonen and J. Hakala (2016). "Test Method for Determining Sound Reduction of Furniture Ensembles." Acta Acustica united with Acustica **102**(1): 67-79.
- Hongisto, V., D. Oliva and L. Rekola (2015). "Subjective and objective rating of spectrally different pseudorandom noises—Implications for speech masking design." The Journal of the Acoustical Society of America **137**(3): 1344-1355.
- ISO-14257 (2002). "Acoustique - Mesurage et description paramétrique des courbes de décroissance sonore spatiale dans les locaux de travail en vue de l'évaluation de leur performance acoustique", Afnor.
- Levenson, H. (1974). "Activism and powerful others: Distinctions within the concept of internal-external control." Journal of personality assessment **38**(4): 377-383.

- Liebl, A., J. Haller, B. Jödicke, H. Baumgartner, S. Schlittmeier and J. Hellbrück (2012). "Combined effects of acoustic and visual distraction on cognitive performance and well-being." Applied Ergonomics **43**(2): 424-434.
- Lund, S. P., J. Kristiansen, R. Persson, H. Shibuya, J. Toftum, G. Clausen and (2012). Cognitive test performance following exposure to noise in an open-office simulation study. Joint Baltic-Nordic Acoustics Meeting, Danish Acoustical Society.
- Muet, Y. L. and P. Chevret (2016). Les dessous de la norme NF S 31-199 sur les bureaux ouverts. 13ème Congrès Français d'Acoustique, Le Mans.
- NF-S31-199 (2016). Acoustique - Performances acoustiques des espaces ouverts de bureaux
- Schlittmeier, S., J. Hellbrück, R. Thaden and M. Vorländer (2008). "The impact of background speech varying in intelligibility: Effects on cognitive performance and perceived disturbance." Ergonomics **51**(5): 719-736.
- Thayer, R. E. (1978). "Toward a psychological theory of multidimensional activation (arousal)." Motivation and Emotion **2**(1): 1-34.
- Toftum, J., S. Lund, J. Kristiansen and G. Clausen (2012). Effect of open-plan office noise on occupant comfort and performance. 10th International Conference on Healthy Buildings.
- Veitch, J. A., J. S. Bradley, L. M. Legault, S. Norcross and J. M. Svec (2002). "Masking speech in open-plan offices with simulated ventilation noise: noise level and spectral composition effects on acoustic satisfaction." Institute for Research in Construction, Internal Report IRC-IR-846.
- Weber, J. (2014). Mise au point d'une méthode de mesure d'indicateurs acoustiques en présence de bruit ambiant. INRS, ENSSAT Lannion.
- Witterseh, T., D. P. Wyon and G. Clausen (2004). "The effects of moderate heat stress and open-plan office noise distraction on SBS symptoms and on the performance of office work." Indoor Air **14**(s8): 30-40.
- Yanglou, H. (2015). Development of a measurement system for open plan spaces. INRS, University of British Columbia, Canada.