

Prédiction de l'Ambiance Acoustique des Bureaux Ouverts

J. Jagla^a, I. Schmich^a, P. Jean^a, P. Chevret^b et J. Chatillon^b

^aCSTB, 24 rue Joseph Fourier, 38400 Saint Martin D'Hères, France

^bINRS, rue Morvan, 54519 Vandoeuvre Les Nancy, France

jan.jagla@cstb.fr

Les occupants des bureaux ouverts expriment souvent une double gêne par rapport aux nuisances sonores : l'une due à une perte de concentration et l'autre due à une réduction de la confidentialité des conversations. La prédiction de l'ambiance acoustique de ces environnements de travail permet, dès la conception, d'optimiser le confort acoustique de leurs occupants. Dans un premier temps, la précision de l'outil de lancer de faisceaux développé au CSTB (ICARE) est estimée par comparaison avec une méthode de simulation acoustique de référence, la méthode des éléments de frontières. Les niveaux de pression acoustique dus à une source ponctuelle sont comparés dans deux cas d'étude simplifiés : deux postes de travail séparés par une cloisonnette absorbante et un espace contenant seize postes de travail. Dans un second temps, ICARE est confronté à des résultats de mesures effectuées par l'INRS dans un local réel. Différents critères acoustiques (indice de transmission de la parole, décroissance d'énergie par doublement de distance) référencés par la norme relative au mesurage des paramètres acoustiques des bureaux ouverts (NF EN ISO 3382-3 :2013) sont simulés et comparés à leurs valeurs mesurées. Le travail présenté est effectué dans le cadre du projet MEPAS financé par l'ANSES dont l'objectif est de développer une méthode simplifiée de prévision acoustique afin d'étudier l'impact de différents paramètres caractéristiques de bureaux ouverts sur le confort acoustique de leurs occupants.

1 Introduction

Les employés travaillant en bureaux ouverts manifestent souvent une gêne due à l'ambiance sonore de leur lieu de travail. Cette gêne se traduit par une baisse de la concentration et donc de productivité [1], mais également par l'apparition de troubles de la santé tels que la fatigue chronique ou le stress au travail [2]. Des campagnes de mesures acoustiques permettent de mettre en évidence les défauts de conception d'un espace de travail. Cependant, elles ont un coût de mise en œuvre élevé et elles ne peuvent être utilisées que pour diagnostiquer des défauts d'un espace de travail existant. En phase de conception, l'unique approche possible est la prédiction. Celle-ci peut être faite de manière empirique ou par simulation numérique. Keränen et Hongisto ont défini statistiquement des lois empiriques sur la base de campagnes de mesures effectuées sur un panel représentatif de bureaux ouverts existants [3]. En se basant sur les principales caractéristiques d'un espace de travail (dimensions, absorption des parois, etc.), cette approche permet d'estimer certains critères acoustiques caractéristiques d'un bureau ouvert. Cependant, la méthode trouve ses limites lorsque les caractéristiques du bureau étudié diffèrent des caractéristiques de bureaux utilisés pour la définition des lois empiriques. La seconde approche possible est la simulation numérique à partir d'un modèle en trois dimensions de l'espace de travail considéré. Un état de l'art des méthodes de simulations existantes est proposé par Svensson [4]. Dans le présent article, une méthode de lancer de faisceaux implémentée dans le logiciel ICARE [5, 6] et prenant en compte la diffraction par les arêtes est évaluée. Cette approche permet l'estimation de critères acoustiques pour les bureaux ouverts tels que le taux de décroissance d'énergie par doublement de distance (DL_2) et l'indice de transmission de la parole (STI) [7] mais elle nécessite des informations détaillées sur l'espace de travail considéré.

Dans un premier temps, le lancer de faisceaux d'ICARE est confronté, dans deux cas d'étude simplifiés, à une méthode de simulation basée sur les éléments finis de frontières (MICADO3D) [8, 9] et à des résultats de mesures. Le premier cas vise à évaluer l'effet d'une cloisonnette absorbante placée entre deux postes de travail en vis-à-vis. Le second consiste en un bureau ouvert de petites dimensions contenant seize postes de travail. Ces deux études présentent des comparaisons énergétiques du champ de pression dû à une source ponctuelle et sont la première étape de validation de la méthode de lancer de faisceaux d'ICARE

appliquée à la problématique des bureaux ouverts. Le logiciel ICARE est ensuite utilisé pour estimer des critères acoustiques tels que le STI et le DL_2 dans trois espaces de travail réels. Ces résultats sont comparés aux résultats de campagnes de mesures menées dans ces bureaux par l'INRS. L'objectif de l'article est de démontrer la pertinence de l'utilisation du logiciel ICARE pour la prévision de l'ambiance acoustique des bureaux ouverts. L'ensemble de cette démarche s'inscrit dans le cadre du projet MEPAS dont l'objectif est de développer une méthode de prévision acoustique afin d'étudier l'impact de différents paramètres caractéristiques de bureaux ouverts sur le confort acoustique de leurs occupants.

2 Les outils de simulation numérique utilisés

2.1 MICADO3D : Éléments finis de frontière

MICADO3D est un logiciel de simulation acoustique développé par le CSTB, basé sur une approche par éléments finis de frontière (BEM) avec une option permettant d'utiliser des fonctions de Green calculées par une méthode de sources images [8]. Il permet d'estimer avec précision le champ de pression dû à une source acoustique. Cependant, le coût de calcul croît en puissance six de la fréquence. Il est donc difficile d'atteindre des fréquences élevées tout en maintenant des temps de calculs raisonnables. Cette approche de référence est utilisée ici au même titre que les résultats de mesures pour valider le fonctionnement du logiciel de lancer de faisceaux du logiciel ICARE.

2.2 ICARE : Lancer de faisceaux

ICARE est un logiciel de simulation acoustique également développé au CSTB. Il permet de calculer la réponse impulsionnelle entre une source et un récepteur en traçant un nombre fini de trajets acoustiques par une méthode de lancer de faisceaux prenant en compte les effets de diffraction sur les arêtes. Cette approche semble adaptée à la problématique des bureaux ouverts car les trajets diffractés véhiculent une partie non négligeable de l'énergie reçue au niveau d'un point récepteur dans un bureau ouvert [5]. Le calcul d'une réponse impulsionnelle dans ICARE se fait en deux étapes, une étape géométrique calculant les différents trajets acoustiques et une étape acoustique, utilisant les

coefficients d'absorption des matériaux constituant la scène afin d'estimer l'atténuation acoustique propre à chaque trajet. L'ordre maximal de réflexion (noté r) et de diffraction (noté d) sont des paramètres d'entrée du programme permettant l'optimisation du temps de calcul nécessaire à l'obtention d'un résultat suffisamment précis. Dans le cas des bureaux ouverts, des tests de convergence ont montré que des valeurs $5 \leq r \leq 8$ et $d = 2$ permettent d'obtenir une précision suffisante d'un point de vue énergétique. Néanmoins, ces valeurs ne permettent pas l'estimation d'une durée de réverbération compte tenu de l'importance des réflexions tardives dans ce calcul. Ce critère ne sera donc pas considéré dans cet article. L'accent sera mis sur l'estimation de critères directement liés aux calculs énergétiques tels que le STI et le DL_2 .

3 Étude énergétique au niveau d'un poste de travail

3.1 Cas étudié

Dans un premier temps, un cas simple comprenant un sol, un plafond et deux postes de travail séparés par une cloisonnette est considéré pour comparer les performances d'ICARE à MICADO3D et à des résultats de mesures effectués par l'INRS en chambre semi-anéchoïque [6]. Un schéma du dispositif est présenté Figure 1.

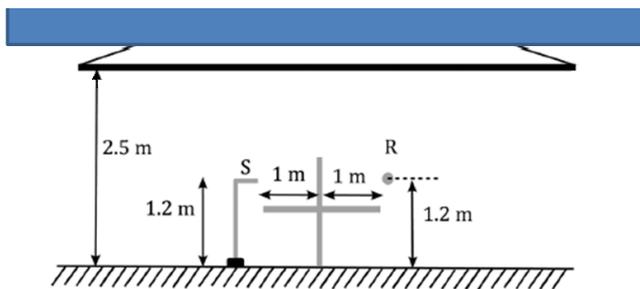


FIGURE 1 – Configuration mesurée. La source est notée S , le récepteur, R , ils sont séparés par un bureau muni d'une cloisonnette.

Compte tenu de la faible complexité du modèle, un ordre de réflexion maximal de $r = 8$ a été choisi pour paramétrer le lancer de faisceaux. Le nombre de diffractions maximal par trajet est fixé à $d = 2$ pour permettre les doubles diffractions sur la tranche de la cloisonnette (voir Figure 2).

Différents plafonds et différentes hauteurs de cloisonnettes ont été considérés lors de cette étude. Les quatre cas principaux sont présentés ici :

1. Sans cloisonnette et plafond absorbant ($\alpha_w = 1$)
2. Sans cloisonnette et plafond peu absorbant ($\alpha_w = 0.6$)
3. Cloisonnette de 130 cm de hauteur et plafond absorbant ($\alpha_w = 1$)
4. Cloisonnette de 130 cm de hauteur et plafond peu absorbant ($\alpha_w = 0.6$)

3.2 Résultats

La Figure 3 compare les niveaux d'énergie simulés en tiers d'octave aux résultats de mesure en chambre semi-anéchoïque. Les tiers d'octave MICADO3D sont calculés en

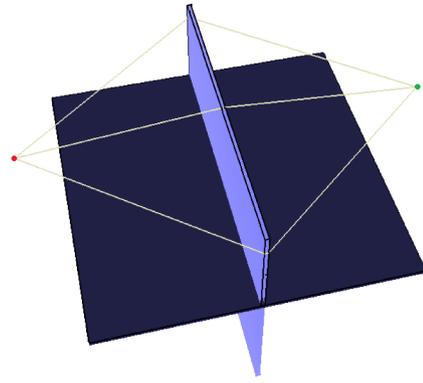


FIGURE 2 – Illustration du phénomène de double diffraction sur les arêtes de la cloisonnette.

moyennant l'énergie sur cinq fréquences par bande de tiers d'octave. Pour ICARE et les mesures, les tiers d'octave sont obtenus à partir des bandes fines.

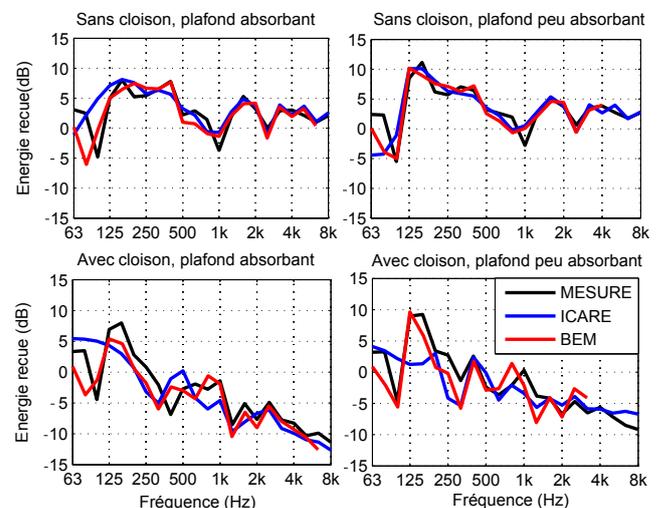


FIGURE 3 – Comparaison ICARE/MICADO/Mesure de l'énergie acoustique en tiers d'octave reçue au point récepteur dans les quatre configurations étudiées.

On remarque une très bonne correspondance entre les deux méthodes numériques et les résultats de mesure lorsqu'il n'y a pas de cloisonnette entre la source et le récepteur. Lorsque la cloisonnette est insérée dans le cas du plafond absorbant, seules les contributions diffractées apportent de l'énergie. On remarque que la diffraction est bien modélisée puisque la correspondance entre simulations et mesures est bonne. Pour vérifier plus précisément le fonctionnement d'ICARE, on présente Figure 4 les résultats en bandes fines lissés afin de visualiser clairement les phénomènes d'interférences. Sur les deux graphes supérieurs, on observe que l'interférence entre l'onde directe et l'onde réfléchi par le bureau sans cloisonnette est bien reproduite. Avec cloisonnette et plafond absorbant la correspondance simulations/mesure est très bonne ce qui confirme la bonne modélisation des effets de diffraction. On remarque un écart en hautes fréquences lorsque le plafond est peu absorbant. Cet écart peut être interprété par une sous-estimation du coefficient d'absorption du plafond en hautes fréquences.

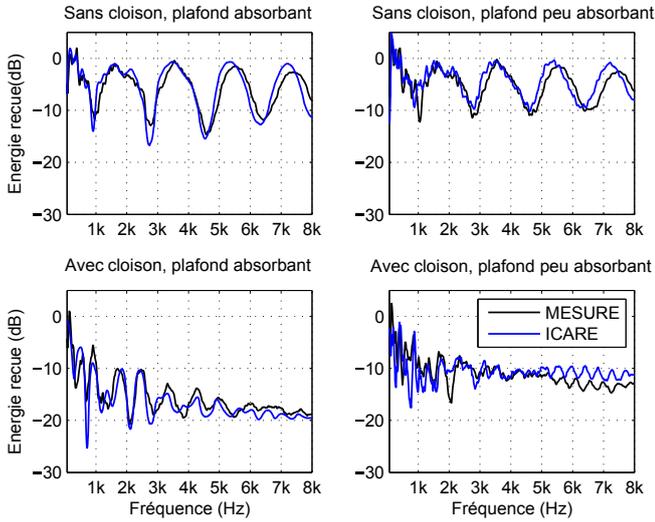


FIGURE 4 – Comparaison ICARE - Mesure de l'énergie acoustique en bande fine reçue au point récepteur dans les quatre configurations étudiées.

4 Étude énergétique au niveau d'un bureau ouvert de petites dimensions

4.1 Cas étudié

La seconde configuration étudiée ici est un espace de travail d'environ 170 m². Cet espace est occupé par quatre marguerites de quatre postes et quatre armoires positionnées contre les murs. Sur chaque marguerite, les postes sont séparés par des cloisonnettes de 130 cm de hauteur. Le maillage utilisé dans MICADO3D pour simuler le problème est illustré Figure 5.

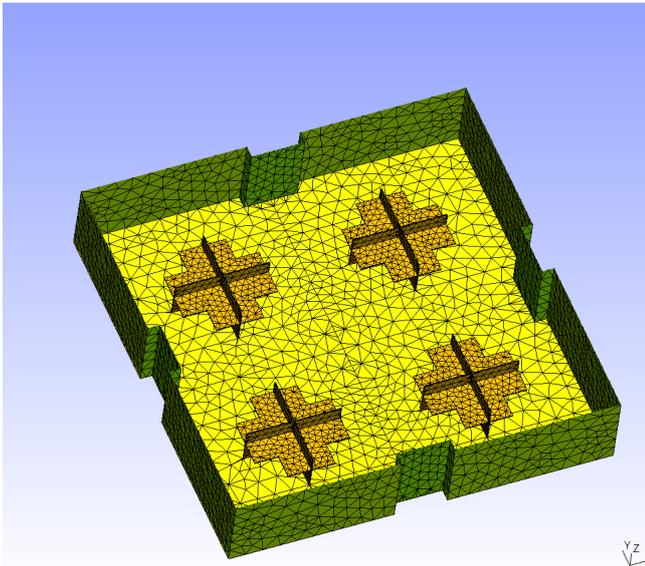


FIGURE 5 – Maillage utilisé dans MICADO3D pour simuler l'espace de travail considéré.

Une source unitaire est positionnée au niveau d'un poste de travail et le champ de pression dans un plan horizontal à 120 cm de hauteur est calculé sur une grille de 10⁴ récepteurs. L'avantage de la méthode MICADO3D basée sur les éléments finis de frontières est que la complexité de l'algorithme est indépendante du nombre de récepteurs

considérés alors qu'elle est linéairement dépendante dans le cas du lancer de faisceaux. Ainsi, pour limiter le temps de calcul nécessaire dans ICARE, l'ordre maximal de réflexions est fixé à $r = 6$ et le nombre maximal de diffractions à $d = 2$. Cette précision s'avère toutefois suffisante pour modéliser les phénomènes physiques mis en jeu. Les calculs MICADO3D sont effectués sur la plage de fréquences [100 1300] Hz par pas de 100 Hz, au-delà de ces fréquences les temps de calculs MICADO3D s'avèrent trop importants.

4.2 Résultats

L'espace modélisé est un espace virtuel, les résultats ICARE sont donc confrontés aux résultats MICADO3D uniquement. La Figure 6 représente les cartes de champ de pression en décibels obtenues sur la grille de récepteurs avec ICARE et MICADO3D aux fréquences pures 400 et 1000 Hz. Les positions des cloisonnettes absorbantes ont été ajoutées en noir pour plus de clarté.

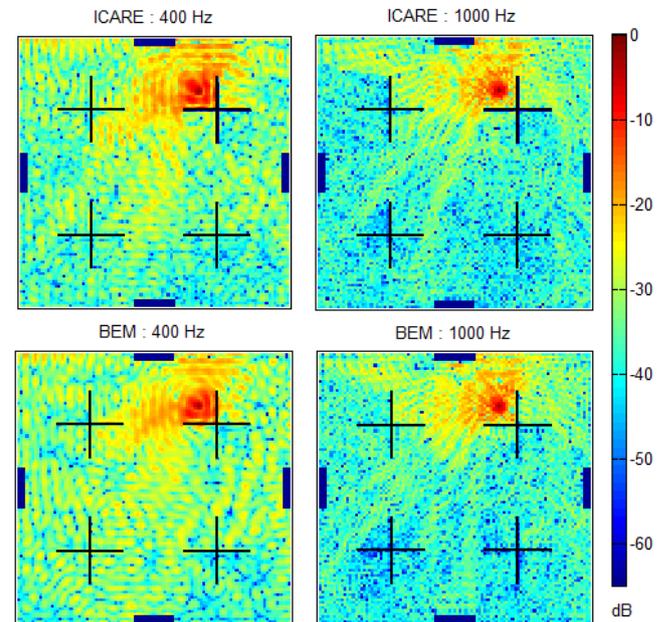


FIGURE 6 – Cartes de pression acoustique due à une source unitaire. Les résultats sont présentés en décibels aux fréquences pures 400 et 1000 Hz.

On observe que les champs de pression obtenus avec les deux méthodes sont très similaires. Les figures d'interférences observées sont quasi identiques. Afin de vérifier ces résultats sur l'ensemble de la gamme de fréquence simulée, on s'intéresse à l'énergie reçue au niveau des zones de travail pour chaque poste. Les zones considérées sont carrées (50 cm de côté) et sont centrées sur la position de la tête d'un employé assis à son poste. Elles sont représentées en vert sur la Figure 7 et identifiées par les lettres de "a" à "o".

La Figure 8 représente l'énergie reçue dans chacune de ces zones en fonction de la fréquence. On observe encore une bonne correspondance entre les résultats MICADO3D et ICARE, l'allure des courbes est respectée même pour les zones qui ne sont pas en visibilité directe de la source. Ces résultats montrent que la précision est suffisante pour permettre l'estimation de critères acoustiques tels que le STI ou le DL₂. Dans la suite, le lancer de faisceaux est utilisé

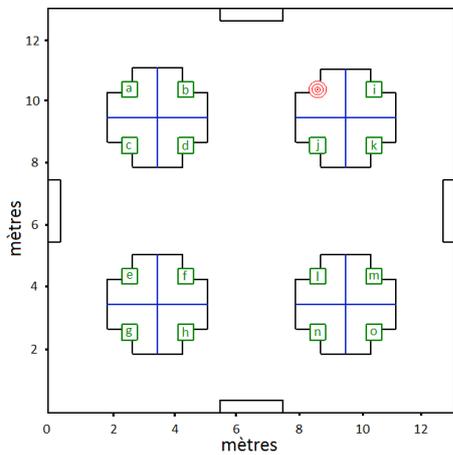


FIGURE 7 – Représentation des zones de 0.25 m^2 représentant la position des employés à leurs postes de travail. La position de la source est illustrée en rouge.

pour estimer ces valeurs de critères sur des espaces de travail réels.

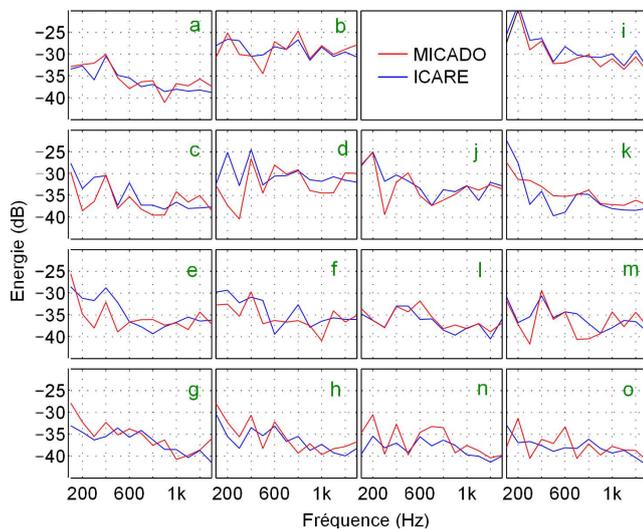


FIGURE 8 – Énergie reçue dans chaque zone réceptrice en fonction de la fréquence. La correspondance entre les graphes et les zones réceptrices est indiquée par les lettres vertes ("a" à "o").

5 Étude de bureaux réels

5.1 Critères acoustiques étudiés

De nombreux critères acoustiques sont répertoriés dans la norme NF EN ISO 3382-3 :2013 relative au mesurage des paramètres acoustiques des bureaux ouverts [7]. Cet article se concentre sur les deux principaux critères qui sont l'indice de transmission de la parole (STI) et le taux de décroissance du niveau de pression acoustique pondéré A par doublement de distance (DL_2). Les autres critères mentionnés dans la norme tels que la distance de distraction (r_D) ou de confidentialité (r_P) ainsi que le niveau de pression acoustique pondéré A de la parole à une distance de 4 mètres ($L_{p,A,S,4m}$) peuvent se dériver facilement à partir de ces deux critères principaux. Le DL_2 , le STI et le bruit de fond ont été mesurés par l'INRS dans trois espaces de travail réels.

Les valeurs de bruit de fond mesurées sont utilisées dans le calcul du STI simulé afin d'évaluer le rapport signal sur bruit nécessaire au calcul. Le calcul du STI est fait conformément à la norme CEI 60268 :16 :2011 [10].

5.2 Espaces étudiés

Le premier espace considéré est un petit bureau ouvert de 90 m^2 contenant une dizaine de postes de travail. Il contient deux marguerites de quatre postes séparés par les cloisonnettes de faible qualité acoustique et un plan de travail sans cloisonnettes formant deux postes supplémentaires. Une baie vitrée longe un côté de la pièce. Trois mesures de STI ont été effectuées dans cet espace. Un aperçu de l'espace considéré est donné Figure 9.1. La source 1 est utilisée pour la mesure du STI au point récepteur 1, la source 2 est utilisée pour les mesures aux points récepteurs 2 et 3. Aucune mesure de décroissance n'a été faite dans cet espace compte tenu de ses faibles dimensions.

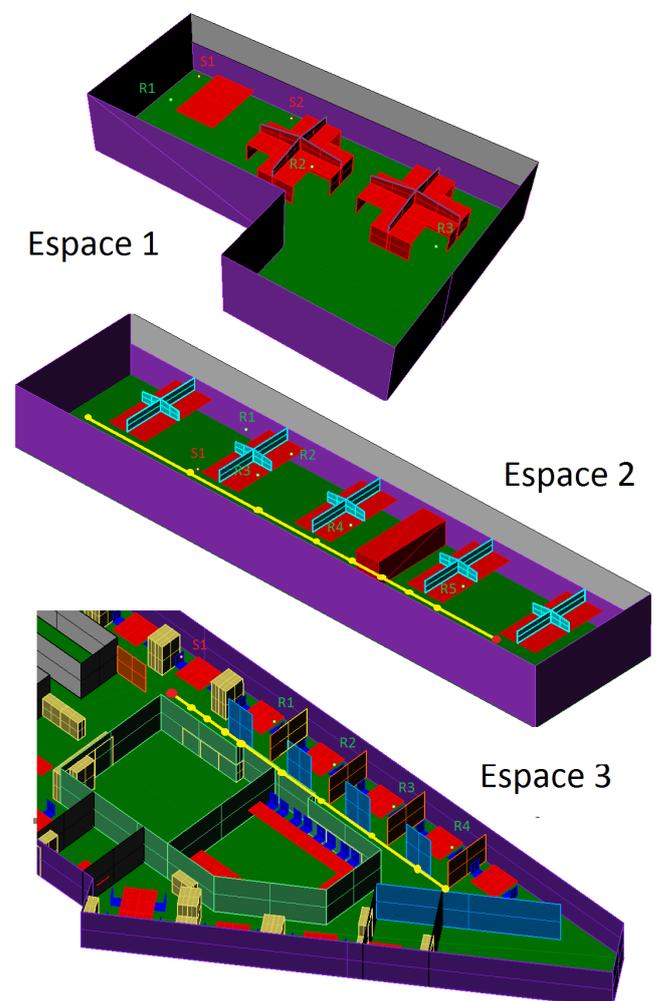


FIGURE 9 – Modèles 3D des espaces considérés. Pour la mesure du STI, les positions des sources sont indiquées par des points rouges et une annotation S, les positions des récepteurs sont indiquées par des points verts et des annotations R. Pour la mesure du DL_2 , la trajectoire de mesurage est indiquée par une ligne jaune, la position de la source en rouge et les positions des récepteurs en jaune.

Le second espace mesure 127 m^2 et contient cinq marguerites de quatre postes séparés par des cloisonnettes absorbantes de 1.25 m de hauteur (voir Figure 9.2). Une baie

vitree longe également un côté de la pièce. Une source et cinq points récepteurs sont utilisés pour la mesure de STI. La trajectoire de mesurage du DL₂ se situe dans l'allée qui longe les postes de travail.

Le troisième espace considéré est un plateau de 850 m². Les postes concernés par les mesures de STI sont séparés entre eux par des cloisons en plâtre de deux mètres de hauteur. Des cloisons en verre séparent les postes de travail de l'allée où est effectuée la mesure du DL₂. Compte tenu des grandes dimensions de cet espace, la moitié seulement est représentée Figure 9.3 pour visualiser précisément les positions de mesure du STI et du DL₂.

Afin d'obtenir des résultats cohérents, les mêmes positions de sources et de récepteurs ont été utilisées en mesure et en simulation. Les coefficients d'absorption des matériaux ont souvent été approximés par des valeurs typiques compte tenu de la difficulté d'obtenir des valeurs exactes d'absorption concernant un bureau ouvert en activité.

5.3 Analyse des résultats

5.3.1 Taux de décroissance d'énergie par doublement de distance (DL₂)

Le DL₂ a été évalué pour les espaces 2 et 3 uniquement compte tenu des faibles dimensions de l'espace 1. Le tableau 1 présente les résultats obtenus. Les écarts observés sont de 1.14 dB pour l'espace 2 et de 1.3 dB pour l'espace 3. Ce sont des écarts faibles mais dans les deux cas ils nous montrent que le DL₂ est plus grand en mesure qu'en simulation. Ce résultat n'est pas étonnant si l'on considère l'impact de l'encombrement d'un espace de travail en activité. Le mobilier de bureau, les plantes, les tableaux aux murs sont des éléments qui contribuent à l'absorption d'un local mais qui ne peuvent pas être modélisés en simulation. Les résultats obtenus sont encourageants, même s'il est évidemment nécessaire de confirmer cette analyse par la modélisation d'un plus grand nombre de bureaux ouverts.

DL ₂	Mesure	ICARE	Différence
Espace 2	5.10 dBA	3.96 dBA	1.14 dB
Espace 3	5.53 dBA	4.23 dBA	1.3 dB

TABLEAU 1 – Comparaison des résultats de mesure et de simulation pour le calcul du DL₂.

5.3.2 Indice de transmission de la parole (STI)

Le tableau 2 présente les résultats de mesures et de simulation du STI obtenus pour les trois espaces considérés. Les calculs du STI à partir des mesures comme à partir des simulations sont basés sur les niveaux de bruit ambiant mesurés afin d'estimer le rapport signal sur bruit nécessaire au calcul. On remarque que la différence entre simulation et mesure est inférieure à 0.1 pour les douze valeurs mesurées. L'écart moyen est de 0.05, on peut donc considérer que la précision dans l'estimation du STI est bonne. Les écarts observés peuvent être dus aux incertitudes d'estimation des coefficients d'absorption des matériaux et des positions des sources et des récepteurs ainsi qu'à l'encombrement du bureau en activité. Dans l'ensemble, l'estimation de STI à partir de réponses calculées dans ICARE, produit des résultats très proches de la réalité.

STI		Mesure	ICARE	Différence
Espace 1	R1	0.74	0.79	-0.05
	R2	0.72	0.66	0.06
	R3	0.59	0.54	0.05
Espace 2	R1	0.82	0.83	-0.01
	R2	0.76	0.79	-0.03
	R3	0.82	0.79	0.03
	R4	0.65	0.72	-0.07
Espace 3	R5	0.53	0.52	0.01
	R1	0.68	0.77	-0.09
	R2	0.57	0.64	-0.07
	R3	0.49	0.50	-0.01
	R4	0.43	0.49	-0.06

TABLEAU 2 – Comparaison des résultats de mesure et de simulation pour le calcul du STI.

6 Discussion

Une validation en trois étapes du logiciel de lancer de faisceaux ICARE appliqué à la problématique des bureaux ouverts a été présentée. De l'étude de l'effet d'une cloisonnette, jusqu'à un espace de travail complet, la précision de l'outil de prédiction a été évaluée. Il a été démontré que les phénomènes de propagation acoustique étaient bien restitués même si des écarts entre simulations et mesures persistent. Il est difficile de statuer sur l'origine des écarts observés mais l'incertitude sur les valeurs de coefficients d'absorption utilisés peut être la principale source d'erreurs. De plus, l'encombrement des espaces étudiés ne peut être modélisé en simulation et a lui aussi un impact non négligeable sur la propagation acoustique au sein d'un bureau. Pour l'estimation du DL₂, l'étude d'un nombre de supérieur de bureaux pourrait permettre de définir statistiquement un facteur correctif à appliquer au DL₂ pour simuler la prise en compte de l'encombrement.

Malgré les écarts, les résultats obtenus sont d'ores-et-déjà suffisamment précis pour permettre une estimation pertinente du DL₂ et du STI. Cette étude sera complétée dans le cadre du projet MEPAS, par la comparaison mesures/simulations d'autres espaces de travail afin de confirmer les tendances exposées dans cet article.

Remerciements

Ces travaux avaient pour cadre le projet de recherche MEPAS effectué avec le concours apporté par le Programme Environnement-Santé-Travail de l'ANSES avec le soutien des ministères chargés de l'écologie et du travail.

Références

- [1] A. Ebissou, P. Chevret, and E. Parizet. Objective and subjective assessment of disturbance by office noise - relevance of the use of the speech transmission index. In *Congrès Français d'Acoustique, Nantes, 2012*.
- [2] Agence Française de Sécurité Sanitaire Environnementale. *Impact sanitaires du bruit, Etat des lieux, Indicateurs bruit-santé*. Novembre 2004.

- [3] J.Keränen and V. Hongisto. Prediction of the spatial decay of speech in open-plan offices. *Applied Acoustics*, 74 :1315–1325, 2013.
- [4] U.P. Svensson and U.R. Kristiansen. Computational modelling and simulation of acoustic spaces. In *AES 22nd International Conference on Virtual, Synthetic and Entertainment Audio, Espoo, Finland*, 2002.
- [5] I. Schmich, N. Hermant, N. Noé, C. Rougier, and M. Asselineau. Quelle précision attendre des outils de simulation pour l’application aux bureaux à espace décroisé ? In *Congrès Français d’Acoustique, Lyon*, 2010.
- [6] I. Schmich, C. Rougier, P. Jean, and P. Chevret. Efficiency of an acoustic table screen between two work stations in open plan offices. In *Congrès Français d’Acoustique, Nantes*, 2012.
- [7] Association française de normalisation. NF EN ISO 3382-3, Acoustique - Mesurage des paramètres acoustiques des salles - partie 3 : Bureaux ouverts, 2013.
- [8] P. Jean. A variational approach for the study of outdoor sound propagation and application to railway noise. *Journal of Sound and Vibration*, 212(2) :275–294, 1998.
- [9] P. Jean. A multi domain BEM approach. Application to outdoor sound propagation and tyre noise. In *Euronoise, Tampere, Finland*, 2006.
- [10] Commission Electrotechnique Internationale. CEI 60268-16 Sound system equipment - part 16 : Objective rating of speech intelligibility by speech transmission index, 2011.