

## Quelle précision attendre des outils de simulation pour l'application aux bureaux à espace décroissant ?

I. Schmich<sup>1</sup>, N. Hermant<sup>1</sup>, N. Noé<sup>1</sup>, C. Rougier<sup>1</sup> et M. Asselineau<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Université Paris-Est, Centre Scientifique et Technique du Bâtiment, 24 Rue Joseph Fourier 38400 Saint Martin D'Hères, isabelle.schmich@cstb.fr

<sup>2</sup>Peutz & Associés, 10 B rue des Messageries, 75010 Paris, France

Les espaces de bureaux livrés à blanc sont souvent aménagés par la suite en bureaux à espace décroissant. Les outils de simulation actuellement à disposition des acousticiens concepteurs ne sont pas assez performants pour prédire la qualité acoustique dans un bureau paysagé. Les limites sont surtout dues à la forme géométrique des bureaux (larges et plats), le nombre de surfaces réfléchissantes et la non-prise en compte de la diffraction ou de la directivité des sources. Cet article présente les résultats d'une étude sur un cas concret d'aménagement de bureau paysagé. L'étude de simulation sera effectuée avec le logiciel de lancer de faisceaux ICARE développé par le CSTB en incluant une comparaison des résultats avec et sans diffraction. Les résultats seront comparés avec des résultats de simulations effectuées avec d'autres logiciels de simulation.

### 1 Introduction

Actuellement peu de logiciels d'acoustique des salles vendus dans le commerce prennent en compte le phénomène de diffraction qui a lieu lorsqu'une onde rencontre une arête ou une surface courbe. Dans des salles où le champ est à peu près diffus, où les réflexions sur les surfaces sont prépondérantes et où les distances entre source et récepteurs sont grandes, la contribution apportée par le phénomène de diffraction dans la simulation acoustique peut être négligeable. Mais dans des salles comme les bureaux à espace décroissant, où se trouvent des surfaces comme le plafond avec des coefficients d'absorption très élevés, on pourrait présumer que la diffraction joue un rôle non négligeable et pourrait changer de façon notable les résultats obtenus par la modélisation, et ce d'autant plus pour des cas où la source et le récepteur ne sont pas visibles l'un de l'autre [1].

Cet article présente des simulations numériques dans un modèle de bureau ouvert correspondant à un centre d'appel. Les calculs ont été réalisés avec ICARE développé par le CSTB [2, 3] et sont basés sur la méthode de lancer de faisceaux intégrant des modèles de diffraction, ce qui permet de prendre en compte la pénétration du champ acoustique dans les zones d'ombres. Une comparaison de résultats avec et sans diffraction est réalisée dans cette étude ainsi qu'une comparaison avec des résultats obtenus par Peutz & Associés [4].

### 2 Configuration des deux études

#### 2.1 Configuration de l'étude Peutz & Associés

Le bureau ouvert étudié par Peutz & Associés (cf. Figure 1) est un centre d'appel typique de forme parallélépipédique et de dimensions 31.5 x 12.8 x 3.1 m<sup>3</sup> pouvant accueillir jusqu'à 60 opérateurs. Ce type de bureau est généralement soumis à des niveaux de bruit assez élevés du fait que les nombreuses sources sonores (constituées par

les opérateurs) ne sont séparées entre elles que par des cloisonnettes.

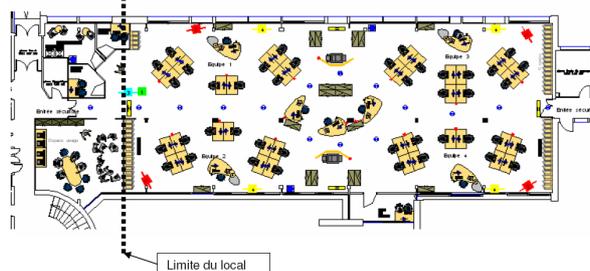


Figure 1 : vue 2D du bureau ouvert et des postes de travail

L'étude réalisée par Peutz & Associés s'intéresse à la durée de réverbération dans le local, la décroissance spatiale et la cartographie du niveau de bruit moyen pour différentes configurations de la salle. Pour réaliser ces calculs les modèles numériques présentés sur la Figure 2 et Figure 3 ont été utilisés. On peut voir que le mobilier et les tables ont été représentés à l'aide d'une surface équivalente située à 0.8 m du sol.

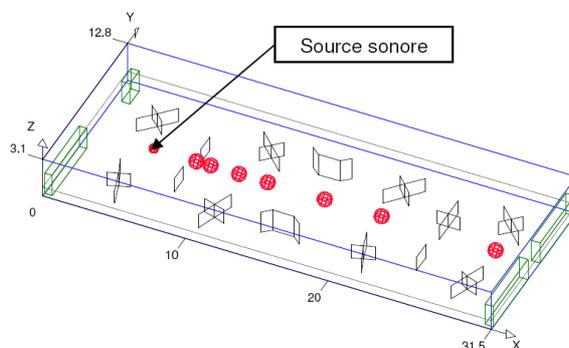


Figure 2 : Modèle utilisé par Peutz & Associés pour la décroissance spatiale

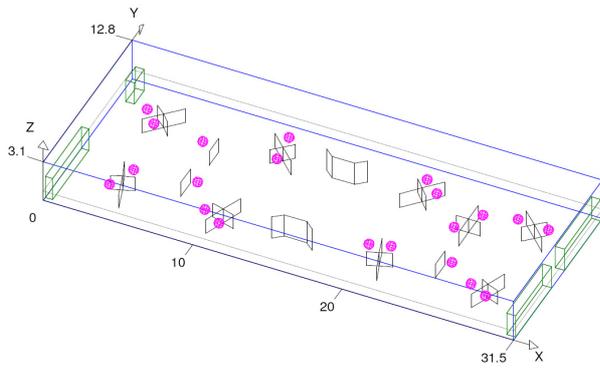


Figure 3: Modèle utilisé par Peutz & Associés pour la cartographie

Les différentes configurations font varier la hauteur des cloisonnettes de 1.10 m à 1.50 m et les propriétés des matériaux appliquées. Les sources sonores utilisées sont des sources omnidirectionnelles avec des spectres de puissance correspondant à la voix des téléconseillers du centre d'appel. Les récepteurs sont également omnidirectionnels et ont été placés suivant l'arrêté du 30 août 1990 relatif à la correction acoustique des locaux de travail qui stipulent que la source sonore doit être placée au sol et que les points de mesurage sont placés à une hauteur de 1,2 m et à des distances au sol de 3, 4, 6, 8, 12, 16 et 24 m de la source [5]. Dans le modèle pour la cartographie, les récepteurs sont placés suivant une grille à 1.10 m du sol, chaque récepteur étant séparé par un entraxe de 2 m par 2 m.

## 2.2 Configuration de l'étude CSTB

A la différence du modèle de Peutz & Associés le modèle 3D utilisé pour réaliser les modélisations numériques sous ICARE prend en compte le phénomène de diffraction qui a lieu au niveau des arêtes des cloisonnettes. Les arêtes de diffraction ont été disposées sur les arêtes verticales et horizontales des bureaux ainsi que sur celles des deux paravents. De plus dans notre modèle nous avons choisi de représenter les tables plutôt que d'utiliser une surface équivalente, le reste du mobilier a été ignoré.

Les matériaux ont les mêmes propriétés que ceux utilisés par Peutz & Associés : les tables, cloisonnettes, armoires et murs sont purement réfléchissants, le plafond a un coefficient d'absorption de 0.95 à 1000 Hz et celui du sol est de 0.13 à 1000 Hz. Les sources et les récepteurs ont été choisis omnidirectionnels et sans spectre de puissance. Leur positionnement respecte la configuration donnée par l'arrêté du 30 août 1990 relatif à la correction acoustique des locaux de travail pour le calcul de la décroissance spatiale ; pour la cartographie, en revanche, la grille de récepteurs (en vert sur la Figure 5) ainsi que la source (en rouge sur la Figure 5) ont été placées à 1.15 m du sol pour représenter une position semblable à une personne assise. De plus, chaque point de la grille de récepteurs est en réalité composé d'une sphère correspondant aux dimensions caractéristiques de la tête avec 7 récepteurs. Cette sphère de récepteurs nous permet de nous affranchir des problèmes de modes pouvant entraîner des variations de champ de pressions sur de faibles distances. Pour cela nous calculons la pression en ces sept points et nous prenons la moyenne quadratique pour réaliser la carte de bruit.

Notre but étant de montrer l'influence de la prise en compte de la diffraction dans les simulations nous n'avons

pas étudié l'influence de la hauteur des cloisonnettes et nous avons choisi cette hauteur à 1.30 m afin que source et récepteurs soient situés dans des zones d'ombres.

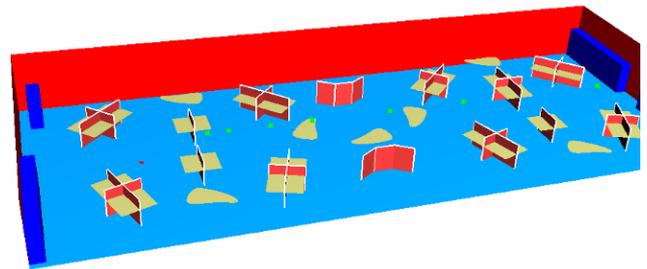


Figure 4 : Modèle utilisé par le CSTB pour la décroissance spatiale

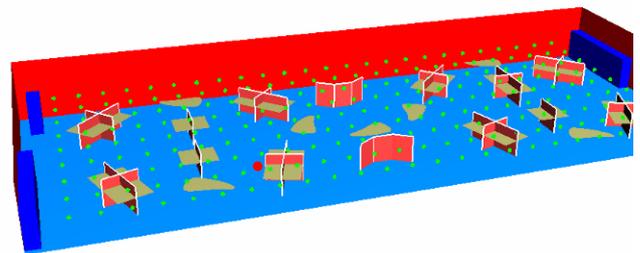


Figure 5 : Modèle utilisé par le CSTB pour la cartographie

## 3 Comparaisons des résultats Peutz & Associés et CSTB

Les résultats de Peutz & Associés présentés dans cette partie sont ceux calculés avec la configuration pour laquelle les cloisons mesurent 1.30 m de hauteur.

### 3.1 Décroissance spatiale

La Figure 6 ci-dessous présente les résultats de décroissance spatiale obtenue par Peutz & Associés, la courbe rose est une régression des résultats à chaque récepteur noté par un « + ». Les courbes verte et bleue correspondent aux décroissances réglementaires pour un local de cette surface, respectivement pour un local vide et pour un local encombré [5]. On constate que le modèle de Peutz & Associés donne une décroissance spatiale avec des valeurs de  $DL_2$  (décroissance linéaire par doublement de distance) de 4.0 dB et est légèrement en dessous de la décroissance réglementaire d'un local encombré dont le  $DL_2$  est de 3.7 dB pour cette surface.

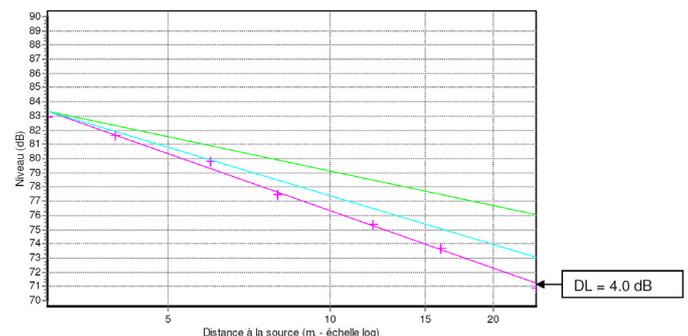


Figure 6: Décroissance spatiale calculé par Peutz

La Figure 7 ci-dessous présente les résultats de décroissance spatiale du modèle du CSTB calculés à l'aide d'ICARE. Les courbes rouge et bleue correspondent respectivement aux régressions des résultats à chaque récepteur noté par un « + » rouge et bleu. La courbe bleue représente la décroissance spatiale calculée en prenant en compte la diffraction et la courbe rouge correspond à la décroissance spatiale calculée sans prendre en compte la diffraction.

Nous obtenons des valeurs de  $DL_2$  de 3.02 dB et 2.86 pour les simulations avec diffraction et sans diffraction respectivement.

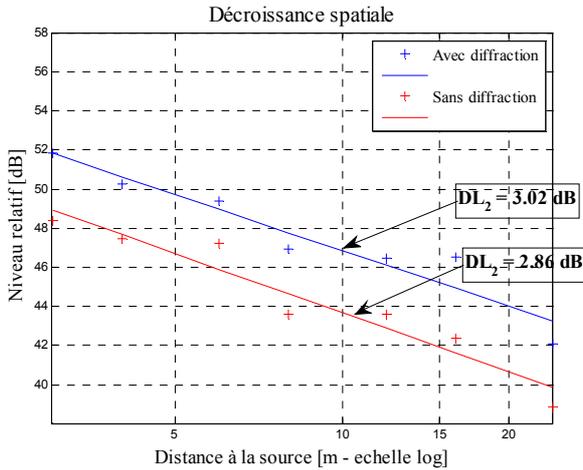


Figure 7: Décroissance spatiale calculée avec ICARE

### 3.2 Cartographie du niveau de bruit moyen

La Figure 8 ci-dessous présente la carte de niveau de bruit moyen calculée par Peutz et Associés avec 21 sources (en rose sur la figure).

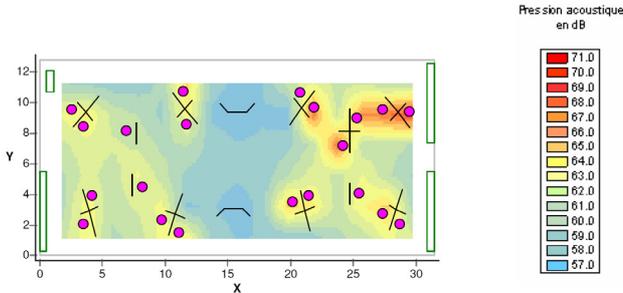


Figure 8 : Carte de niveau de bruit moyen calculée par Peutz et Associés

La Figure 9 ci-dessous présente le niveau de bruit moyen calculé par le CSTB à l'aide d'ICARE avec une source.

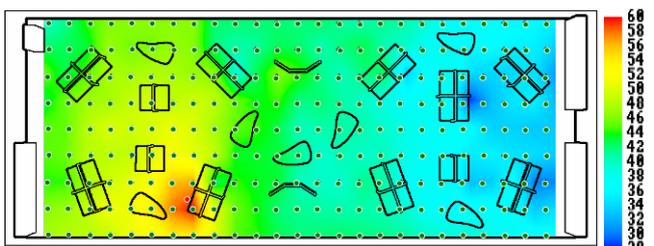


Figure 9 : Carte de niveau de bruit moyen calculée par le CSTB

## 4 Résultats CSTB

Les calculs de cartographie calculés au CSTB ont été réalisés à l'aide d'ICARE avec une profondeur maximale de réflexion de 8, en se limitant à une diffraction par trajet acoustique ainsi qu'à deux réflexions de part et d'autre d'une diffraction. La grille de récepteurs est composée de  $7 \times 225 = 1575$  récepteurs et nous nous sommes limités à une seule source pour voir les effets de celle-ci dans la salle.

Les Figure 10 et Figure 11 ci-dessous présentent les résultats pour la bande de tiers d'octave de fréquence centrale 1000 Hz en dB relatif, obtenus avec une source unitaire avec et sans la prise en compte de diffraction sur les arêtes des cloisonnettes de bureau.

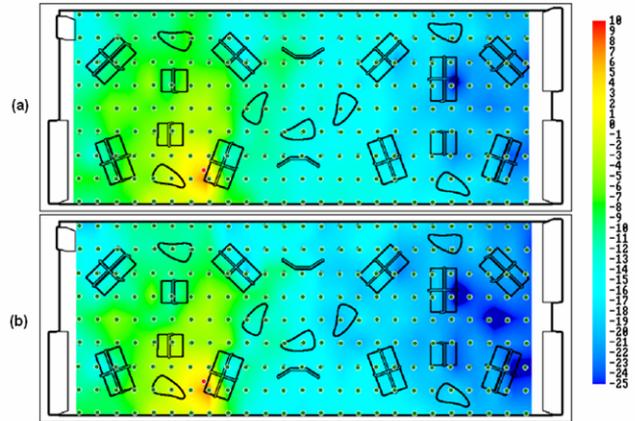


Figure 10: Niveau relatif (en dB) avec diffraction (a) et sans diffraction (b) pour le tiers d'octave centré à 1000 Hz

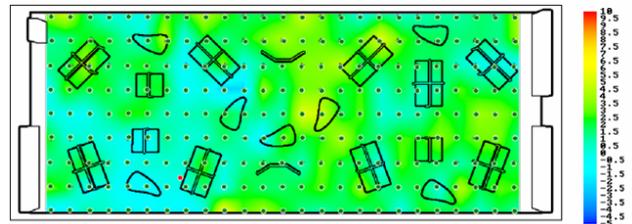


Figure 11: Différence relative (en dB) entre le calcul avec diffraction et le calcul sans diffraction à 1000 Hz

Ces deux figures permettent de constater de grandes différences de niveau entre les calculs avec et sans diffraction pouvant aller jusqu'à 7 dB à certains endroits. Certains récepteurs bien que complètement cachés de la source semblent bien plus impactés par le bruit du fait de la prise en compte de la diffraction. Des résultats similaires ont été observés sur les autres bandes de tiers d'octave comme le montre la Figure 12 pour la bande à 500 Hz.

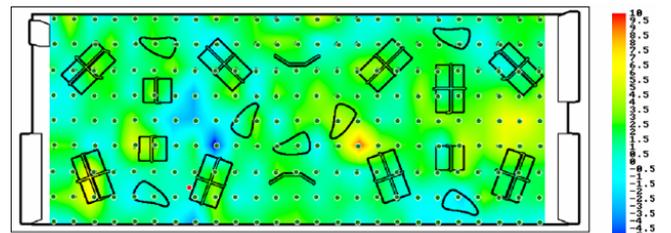


Figure 12 : Différence relative (en dB) entre le calcul avec diffraction et le calcul sans diffraction à 500 Hz

## 5 Limites des résultats

### 5.1 Limitation de la profondeur de part et d'autre une diffraction

Le calcul géométrique avec diffraction, utilisant un algorithme de lancer de faisceaux, a duré 33h sur un Intel Core 2 Quad 2.66 Ghz, 2.75 Go de RAM et ce calcul a été parallélisé pour pouvoir utiliser les quatre processeurs en même temps. Le calcul géométrique sans diffraction a quand à lui mis 1h30. De plus, une seule diffraction par trajet acoustique a été considérée et nous avons choisi de limiter les calculs à deux réflexions de part et d'autre d'une diffraction. Or dès lors que l'on augmente cette limite les temps de calcul explosent, pourtant l'augmentation de cette limite semble cruciale pour assurer la convergence des calculs comme le montre la Figure 13. Sur cette figure le calcul a été réalisé entre une source ( $x=42.8\text{m}$  ;  $y=42\text{m}$  ;  $z=1.2\text{m}$ ) et un récepteur ( $x=55.4\text{m}$  ;  $y=49.1\text{m}$  ;  $z=1.2\text{m}$ ) (cf. Figure 14) pour des profondeurs de réflexion de part et d'autre d'une diffraction allant de 1 à 8 (8 étant la profondeur maximale de réflexion du calcul).

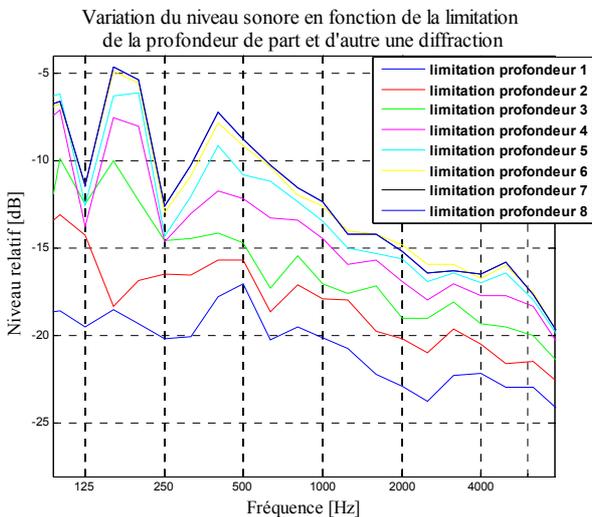


Figure 13: Variation du niveau sonore en fonction de la limitation de la profondeur de part et d'autre d'une diffraction

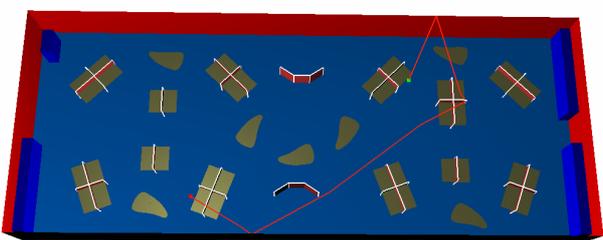


Figure 14 : exemple de trajet diffracté entre la source et le récepteur

A partir des résultats de la Figure 13 on peut estimer que les calculs convergent de façon acceptable à partir de l'ordre 5.

### 5.2 Prise en compte de la diffraction uniquement dans les zones d'ombre

Dès lors, il a été recherché une solution pour pouvoir augmenter la profondeur de part et d'autre d'une diffraction sans pour autant avoir des temps de calcul exorbitants.

Une des options possibles avec l'algorithme de diffraction implanté sous ICARE est de ne considérer que les trajectoires diffractées dans les zones d'ombres [6] et de ne pas prendre en compte les trajectoires dans les zones dites « illuminées ». On ne considère donc que les trajets pour lesquels les points de réflexion avant et après la diffraction n'ont pas de champ direct. La Figure 15 présente les cartes de bruit (en dB relatif) pour la bande de tiers d'octave à 1000 Hz obtenues avec la prise en compte du phénomène de diffraction dans toutes les zones et la prise en compte uniquement dans les zones d'ombre. La Figure 16 représente la différence de niveau relatif entre ces deux calculs.

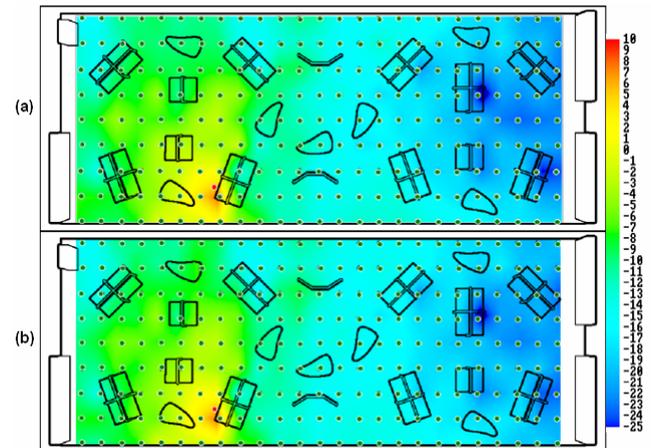


Figure 15 : Niveau relatif (en dB) avec diffraction complète (a) et avec diffraction uniquement dans les zones d'ombre (b), pour le tiers d'octave centré à 1000 Hz

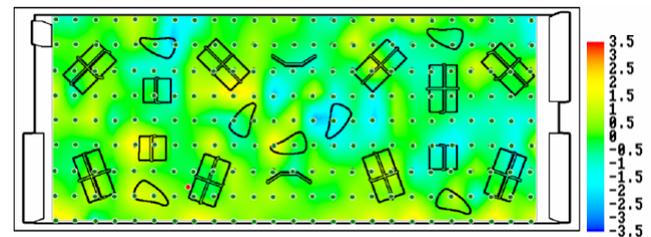


Figure 16 : Différence relative (en dB) entre le calcul avec diffraction complète et le calcul avec diffraction uniquement dans les zones d'ombre pour le tiers d'octave centré à 1000 Hz

Les Figure 15 et Figure 16 permettent de voir que la prise en compte de la diffraction uniquement dans les zones d'ombres n'entraîne pas d'énormes différences (2 dB de différence au maximum). Ceci est vrai pour des fréquences supérieures à 800 Hz mais pour des fréquences allant de 125 Hz à 600 Hz on trouve des différences de niveau entre les deux calculs pouvant aller jusqu'à 3 ou 4 dB. La Figure 17 présente cette différence relative à 500 Hz.

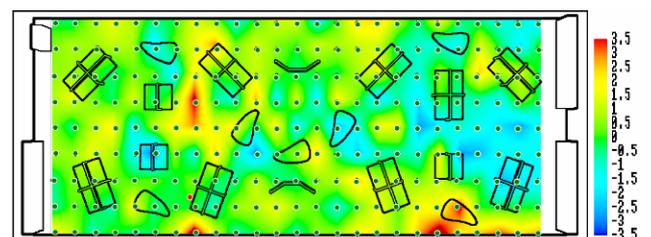


Figure 17 : Différence relative (en dB) entre le calcul avec diffraction complète et le calcul avec diffraction uniquement dans les zones d'ombre pour le tiers d'octave centré à 500 Hz

Ces résultats ne sont pas étonnants et correspondent à ce que l'on pouvait attendre, notamment en basse fréquence. En effet le calcul géométrique est basé sur une approche asymptotique qui suppose que la dimension des obstacles soit grande devant la longueur d'onde, or les plus petites mesurent environ 1 m ce qui expliquerait que les résultats uniquement en zone d'ombre soient plus mauvais en dessous de 800 Hz.

La solution de limiter la diffraction dans les zones d'ombre permet de considérablement réduire le temps de calcul. En effet, les temps de calcul ont été divisés par 4 comparé au calcul décrit dans la partie 5. Il faut maintenant tester si cette solution est suffisante pour permettre l'augmentation de la profondeur de réflexion de part et d'autre d'une diffraction sans pour autant faire exploser les temps de calcul. La Figure 18 présente, comme la Figure 13, les niveaux relatifs pour des profondeurs de réflexion de part et d'autre d'une diffraction allant de 1 à 8, sauf qu'ici on ne tient compte que des trajets diffractés dans les zones d'ombre.

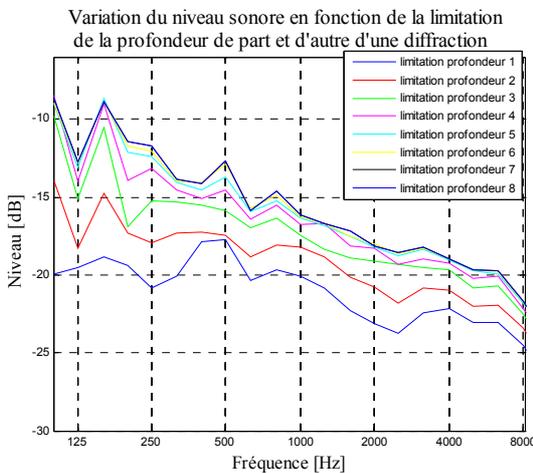


Figure 18 : Variation du niveau sonore en fonction de la limitation de la profondeur de part et d'autre d'une diffraction en zone d'ombre

La Figure 18 permet donc de constater qu'il est possible de limiter la profondeur de réflexion de part et d'autre d'une diffraction à 5 réflexions (voire 4) lorsque l'on ne considère que les trajets diffractés en zone d'ombre.

### 5.3 Combinaison de la diffraction dans les zones d'ombre avec des profondeurs de réflexions avant et après diffraction plus élevée

Les résultats suivants présentent des cartes de bruit qui ont été calculés avec la diffraction uniquement dans les zones d'ombres et des profondeurs de réflexion de part et d'autre d'une diffraction allant jusqu'à 4. Afin de pouvoir simuler plus de cas nous avons choisi de réduire le modèle 3D de moitié (la configuration reste la même que celle décrite dans la partie 2).

Les Figure 19 et Figure 20 permettent d'établir que l'augmentation du nombre de réflexions avant et après la diffraction entraîne une augmentation du niveau de bruit sur tout l'espace, ce qui indique bien que le calcul obtenu sur la Figure 19(a) n'avait pas complètement convergé.

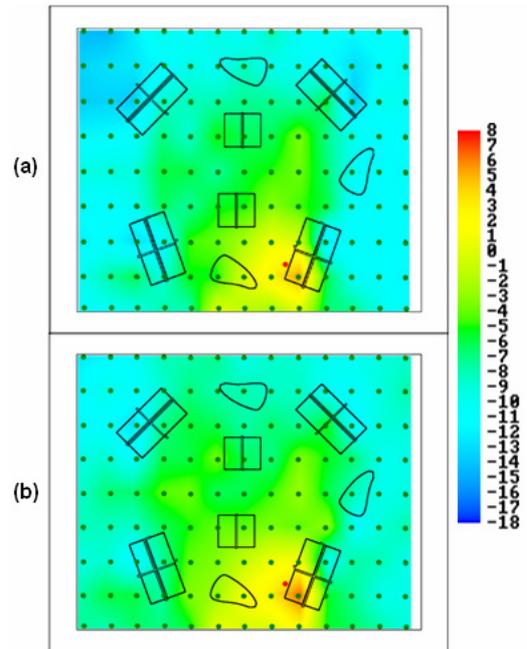


Figure 19 : Niveau relatif en dB à 1000 Hz avec limitation de la profondeur de réflexion de part et d'autre d'une diffraction à 2 réflexions (a) et 4 réflexions (b)

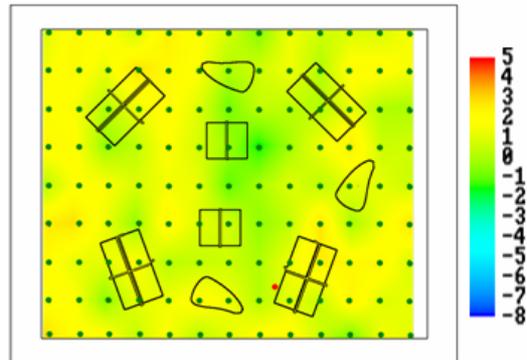


Figure 20 : Différence relative (en dB) entre le calcul avec une limitation de profondeur 4 et le calcul avec une limitation de profondeur 2

Sur ce modèle le calcul converge également à partir de 5 réflexions de part et d'autre d'une diffraction, il faudrait donc encore augmenter cette limitation. Ceci reste donc à faire afin de bien valider l'importance de la prise en compte de la diffraction dans la modélisation.

## 6 Conclusion

Cette étude montre bien l'intérêt qu'il y a de prendre en compte le phénomène de diffraction dans les simulations bien que la modélisation de ce phénomène puisse être extrêmement coûteux en temps de calcul. Comme nous avons vu, il existe cependant des moyens de limiter ces temps de calcul et il est nécessaire de trouver d'autres solutions pour pouvoir augmenter la précision de nos calculs sans augmenter les temps de calcul. Une autre solution pour diminuer les temps de calcul serait de réaliser les calculs en 2,5D, en effet l'approche 3D n'est pas optimisée ici.

Les simulations montrent également que le calcul d'une décroissance spatiale et d'un  $DL_2$  ne permet pas de

caractériser les différences induites par la prise en compte de la diffraction, phénomène qui peut être considéré important dans les bureaux à espace décroisé.

La solution de Peutz & Associés qui a été de choisir une surface équivalente pour modéliser les tables et le reste du mobilier peut être une bonne alternative aux calculs très poussés car elle permet de simplifier les détails géométriques en conservant les propriétés physiques de la scène. Cependant c'est prendre le risque de rapidement perdre la pertinence du calcul concernant l'augmentation ou la diminution du niveau sonore à un emplacement précis.

U.P. Svensson [6] rapporte que des ordres de réflexions élevés sont d'un intérêt limité sachant que dans des situations réalistes, les composantes diffuses et diffractées d'un trajet éclipsent les réflexions spéculaires après seulement quelques ordres de réflexion. En effet, nos calculs ne se sont intéressés qu'à l'influence de la diffraction, la diffusion et la réverbération ont volontairement été omises de cette étude. Mais il serait intéressant d'étudier l'influence de la diffraction lorsque ces deux autres phénomènes sont aussi modélisés.

Une autre limite de notre étude est que les calculs de cartographie ne tiennent compte que d'une seule source sonore alors qu'un bureau à espace décroisé de ce type comporte de nombreuses sources (opérateurs, ventilations,...). De plus, les sources représentant les voix des opérateurs ont une directivité particulière qu'il serait intéressant de considérer dans le cas d'une étude comparant les simulations avec des mesures.

Cette étude a bien démontré la difficulté de prendre en compte la diffraction, voire d'autres phénomènes physiques, lors de simulations acoustiques d'un bureau à espace décroisé. Des grandeurs à valeurs uniques, comme le  $DL_2$  ne permettent malheureusement pas l'analyse approfondie de ces espaces complexes.

## Références

- [1] Christensen C. L., Odeon Room Acoustics Program, Version 7.0, "User Manual", *Industrial, Auditorium and Combined Editions, Odeon A/S*, Lyngby, Denmark, (2004)
- [2] Deille O., Maillard J., Noé N., Bouatouch K. and Martin J., "Real Time Acoustic Rendering of Complex Environments Including Diffraction and Curved Surfaces", *Proceedings of the AES 120th convention*, Paris, France, (2006).
- [3] Noé N., Gaudaire F, Jean P., Vermet M., "A general ray-tracing solution to reflection on curved surfaces and diffraction by their bounding edges", *Proceedings of the ICTCA 9th convention*, Dresden, Germany, (2009).
- [4] Chang D., Peutz & Associés, "Centre d'appel France Télécom type. Etude de l'acoustique interne", *AFNOR S30D N518* (2009)
- [5] Arrêté du 30 août 1990 pris pour l'application de l'article R. 235-11 du code du travail et relatif à la correction acoustique des locaux de travail (1990).
- [6] Tsingos N., Funkhouser T., Ngan A., Carlbom I., "Modeling Acoustics in Virtual Environments

Using the Uniform Theory of Diffraction", *Proceedings of the 28th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, Los Angeles, California, USA, (2001)

- [7] Svensson P., Kristiansen U. R., "Computational Modelling and Simulation of Acoustic Spaces", *Proceedings of the AES 22nd International Conference on Virtual, Synthetic and Entertainment Audio*, Espoo, Finland, (2002).