

# Acoustique des Espaces de travail ouverts

## Optimisation multidimensionnelle

Jens Holger Rindel

Odeon A/S Scion-DTU, DK-2800 kg. Lyngby, Danemark, E-Mail:  
[jhr@odeon.dk](mailto:jhr@odeon.dk)

*Traduit par Jacques Romengas et Frédéric Poirrier*  
frédéricpoirrier@orange.fr

### Introduction

La norme internationale ISO 3382-3: 2012 [1] définit un certain nombre d'indicateurs acoustiques mesurables nécessaires à l'évaluation acoustique objective des espaces de travail ouverts.

Quatre indicateurs sont décrits :

- Distance de distraction  $r_D$
- Taux de décroissance spatiale de l'intelligibilité de la parole  $D_{2,S}$  qui utilise le spectre du niveau de puissance de la parole pondéré A.
- Le niveau de pression acoustique pondéré A de la parole à une distance de 4 m,  $L_{p,A,S,4\text{ m}}$
- Niveau de bruit de fond moyen pondéré A,  $L_{p,A,B}$ .

La distance de distraction est définie comme étant la distance par rapport à une source pour laquelle l'indice de transmission de la parole (STI) passe au-dessous de 0,5.

De plus, deux autres indicateurs peuvent être aussi déterminés. L'indice de transmission de la parole au poste de travail le plus proche ainsi que la distance de confidentialité,  $r_P$  (STI = 0,2) qui correspond la distance source-récepteur où l'indice de transmission de la parole passe au-dessous de 0,2.

Le problème acoustique principal est la distraction engendrée par les conversations entre les personnes. Ce n'est cependant pas un simple problème de bruit qui peut être résolu par un amortissement suffisamment élevé de la pièce. Si le temps de réverbération est très court, les voix éloignées sont entendues avec une grande clarté, ce qui a pour effet de provoquer un niveau de distraction élevé. Une longue durée de réverbération favorise à un environnement très bruyant, ce qui est également dérangeant. Des expériences en laboratoire ont montré qu'une absorption acoustique excessive pouvait avoir un impact négatif sur l'acceptabilité de la perception du bruit par les occupants, et la performance au travail [2].

De même, le bruit de fond ne doit être ni trop bas ni trop haut. Les gens peuvent être incommodés autant par le silence que par le bruit [3].

La distance de distraction est un paramètre particulièrement intéressant car elle prend en compte la plupart des paramètres acoustiques importants, à savoir la quantité d'absorption, l'effet des écrans, l'atténuation spatiale et le masquage par le bruit de fond. Le bruit de fond, mesuré dans le bureau inoccupé, doit être indiqué conformément à la norme ISO 3382-3, mais la norme ouvre la possibilité de procéder à un calcul supplémentaire en utilisant d'autres types de bruit de fond. Par exemple, le bruit provenant de l'activité humaine dans le bureau.

## Bruit causé par les activités humaines

La norme française NF S 31-199 [4] classe les bureaux ouverts en quatre catégories correspondant à différents types d'activités et donc différents niveaux de bruit ambiant dus à l'activité humaine :

- Activité réalisée essentiellement par téléphone,  $L_{A,eq} = 48 \text{ dB à } 52 \text{ dB}$
- Travail collaboratif,  $L_{A,eq} = 45 \text{ dB à } 50 \text{ dB}$ ,
- Travail faiblement collaboratif,  $L_{A,eq} = 40 \text{ dB à } 45 \text{ dB}$ ,
- Accueil du public,  $L_{A,eq} < 55 \text{ dB}$ .

Le niveau de bruit et la distribution temporelle, pour diverses activités de bureau ont été observés et un modèle de prévision du bruit de l'activité humaine en a découlé [5]. La conversation était une source ayant un niveau de pression acoustique plus élevé,  $L_{p,A} = 58 \text{ dB à } 1 \text{ m}$ . Un autre modèle empirique du bruit généré par l'activité humaine a été dérivé des mesures effectuées dans cinq bureaux [6].

## Perturbation par le bruit de la parole

Une enquête récente menée dans 21 bureaux finlandais [7] a montré que le pourcentage de troubles de la parole fortement perturbés (% HD) était corrélé à la distance de distraction et à d'autres paramètres, voir tableau 1. La corrélation avec le bruit de fond (mesuré sans activité humaine) était négative, c'est-à-dire qu'un bruit de fond plus élevé provoque moins de perturbations de la parole. Il est remarquable qu'il n'y ait pas eu de corrélation avec le taux de décroissance spatiale de la parole  $D_{2,s}$ . La corrélation la plus marquée a été trouvée avec le  $L_{p,A,5,4 \text{ m}}$ . Cependant, il a été conclu dans [7] que la distance de distraction est le paramètre acoustique le plus pertinent pour la prédiction de la perturbation par le bruit dans les espaces de travail ouverts.

**Tableau 1:** Relation entre le % HD de la parole et les indicateurs ISO 3382-3. Les données proviennent de Haapakangas et al. [7].

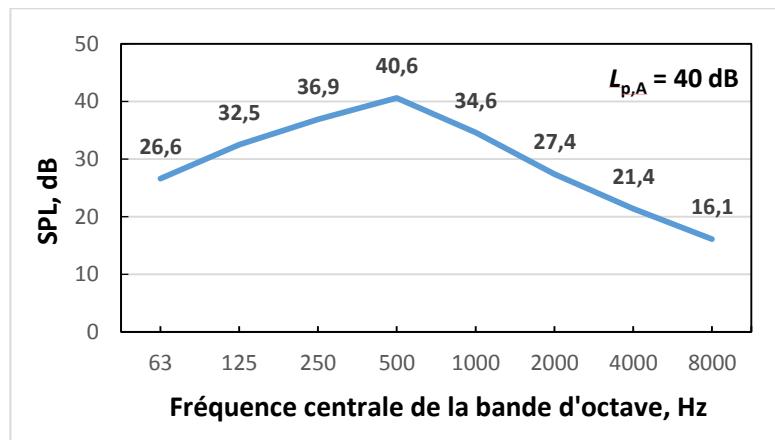
Indicateurs acoustiques	$R^2$ pour % HD par la parole
$r_D$ (m)	0.294
$D_{2,S}$ (dB)	0.007
$L_{p,A,S,4m}$ (dB)	0.327
$L_{p,A,B}$ (dB)	0.266

## Simulations avec le bruit de fond de la parole

Afin de mieux comprendre la relation complexe entre les propriétés acoustiques et les paramètres, une série de simulations a été réalisée à l'aide du logiciel d'acoustique de salle ODEON. Le modèle de la pièce était le même que celui utilisé dans une étude précédente [8]. Le plafond était soit très absorbant, soit très réfléchissant, donnant des temps de réverbération respectivement de 0,4 s et 1,2 s, environ. Les locaux étaient entièrement meublés, sans ou avec des écrans absorbant. Trois hauteurs d'écrans différentes ont été utilisées, à savoir 1,20 m, 1,50 m et 1,75 m. Les temps de réverbération avec les écrans étaient un peu inférieurs à ceux sans écran, environ 0,4 s et 1,0 s.

Les simulations ont été effectuées à l'aide de quatre sources à des positions différentes et de quatre lignes de récepteurs associées à ces positions. Les résultats de chaque simulation correspondant aux paramètres acoustiques de la pièce, sont calculés sur les quatre trajectoires, conformément à la norme ISO 3382-3.

Le bruit de fond variait de 30 dB (pondéré A) à 60 dB par paliers de 5 dB. Comme il s'agissait de simuler le bruit provenant d'activités humaines, c'est-à-dire principalement de la parole, le spectre appliqué au bruit de fond était un spectre typique de la parole, voir la Figure 1.

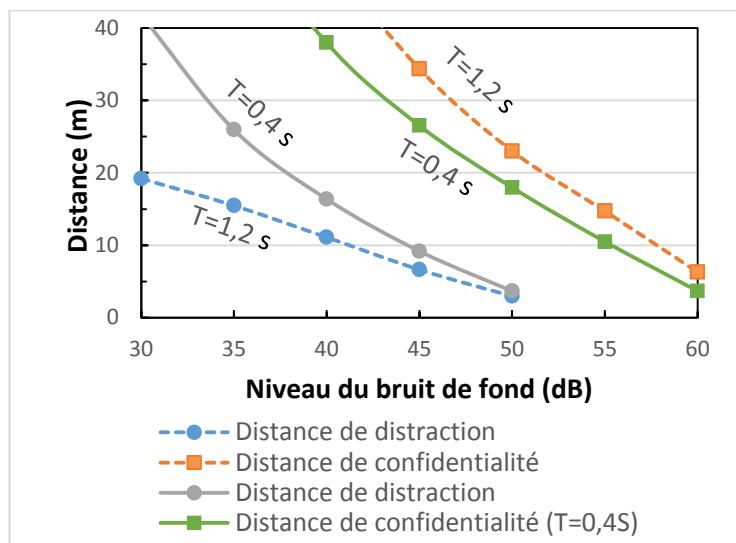


**Figure 1:** Spectre de la parole appliquée aux simulations. La valeur à 63 Hz est de [9], les autres valeurs sont de [1].

## Résultats des simulations

Dans un premier temps, nous examinons les résultats des bureaux sans écrans. La distance de distraction  $r_D$  et la distance de confidentialité  $r_P$  sont reportées en fonction du niveau de bruit de fond, figure 2. Bien que la distance de distraction soit pertinente pour les niveaux de bruit inférieurs à 50 dB, la distance de confidentialité l'est encore plus en cas de bruit de fond plus élevés.

La distance de distraction ne peut pas être déterminée pour des niveaux de bruit de fond très élevés car  $STI < 0,5$  partout, même pour les positions les plus proches de la source.



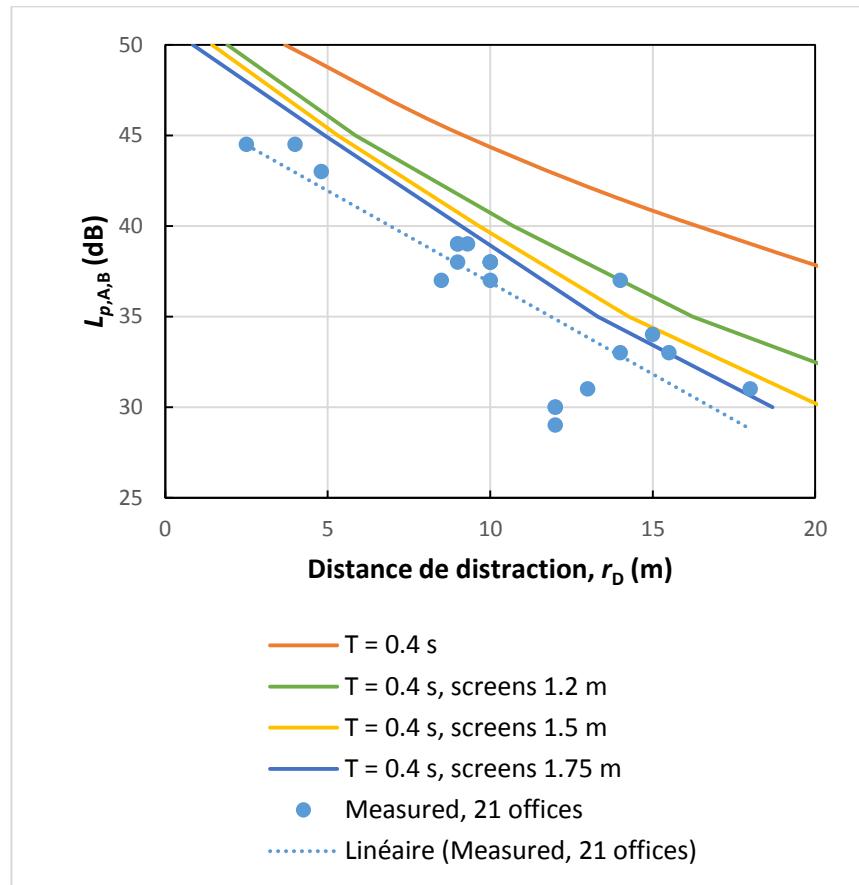
**Figure 2:** Distance de distraction et distance de confidentialité en fonction du niveau du bruit de fond d'après simulations numériques.

L'augmentation de la durée de réverbération a pour effet de réduire le (STI) et, par voie de conséquence, le  $r_D$  et le  $r_P$ . Bien que cela soit vrai pour  $r_D$ , le résultat est inversé pour  $r_P$ . Cela s'explique, car un temps de réverbération plus long diminue le (STI) pour les positions proches, mais n'influence pas le STI pour les positions éloignées, où le rapport signal sur bruit est bas. Ainsi, la pente de la courbe STI en fonction de la distance est plus faible avec un temps de réverbération long qu'avec un temps de réverbération court et le point où  $STI = 0,2$  se déplace sur une distance plus grande.

Une bonne conception acoustique, doit cibler comme objectif, la réduction de la distance de distraction, de préférence inférieure à 5 m, comme cela est recommandé dans l'annexe A de l'ISO 3382-3. Même si ce but puisse être obtenu avec un temps de réverbération très long, il s'agit bien évidemment d'une option inacceptable.

Une autre possibilité pour parvenir à cet objectif est de favoriser un niveau de bruit de fond élevé, proche de 50 dB avec un temps de réverbération de 0,4 s. Cela correspond à la première catégorie de bureaux ouverts de la norme NF S 31-199 [4] dans laquelle le bruit supposé des activités humaines se situe idéalement entre 48 dB et 52 dB.

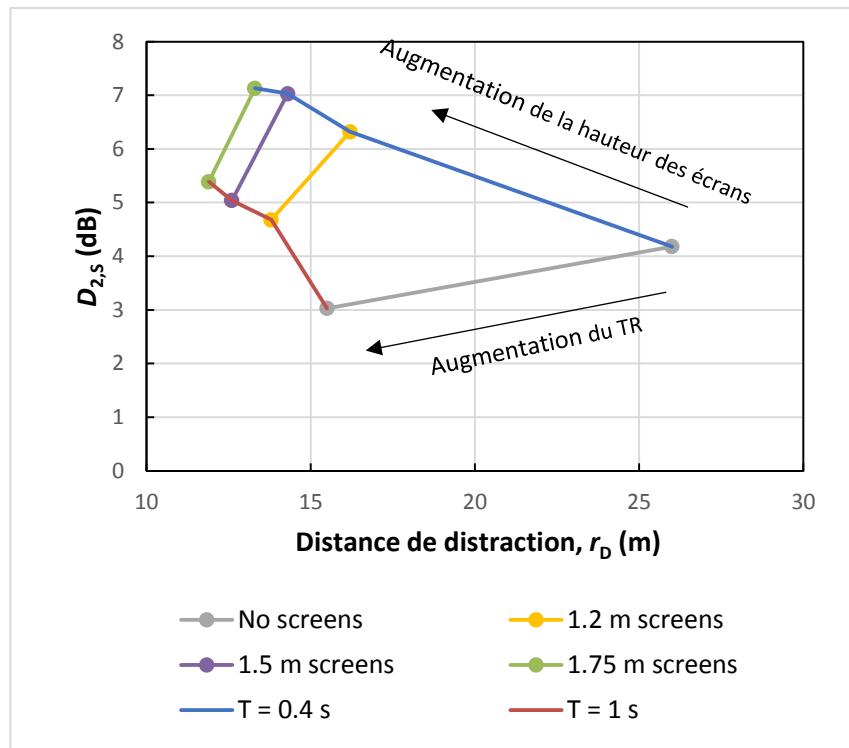
Une autre façon d'atteindre l'objectif ( $r_D \leq 5$  m) est d'introduire des écrans anti-bruit entre les postes de travail. Cela réduit la distance de distraction, voir la figure 3. L'efficacité des écrans est plus marquée lorsque le bruit de fond est faible.



**Figure 3:** Relation entre la distance de distraction et le niveau de bruit de fond. Lignes complètes: Simulations sans et avec des écrans de hauteurs différentes. Points bleus: données mesurées par Haapakangas et al. [7].

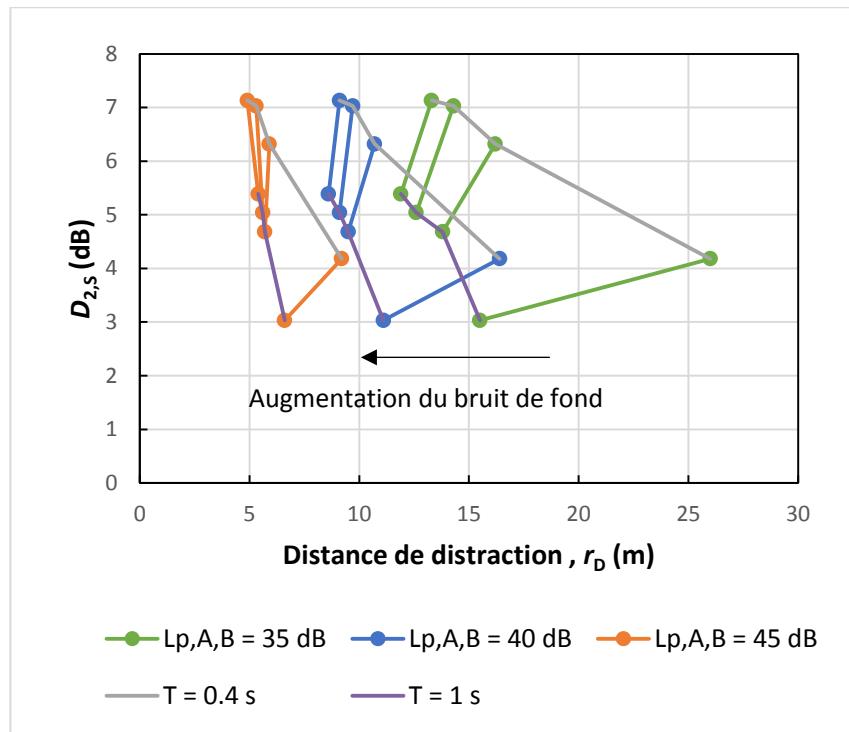
La figure 3 montre la situation des 21 bureaux finlandais indiqués dans [7]. Globalement, ces résultats issus de mesurages suggèrent des écrans hauts et plus rapprochés que ceux appliqués dans les bureaux simulés. Malgré tout, la relation entre le bruit de fond et la distance de distraction dans les simulations présente une pente similaire à celle de la droite de régression linéaire des données mesurées. La pente est d'environ -1 dB par m ( $R^2 = 0,69$ ).

L'effet des écrans, illustré figure 4, combine les deux paramètres, c'est-à-dire distance de distraction et taux de décroissance spatiale de la parole. On remarque que l'augmentation du temps de réverbération (TR) entraîne une diminution à la fois de  $r_D$  et de  $D_{2,S}$ . L'introduction d'écrans avec une augmentation de leur hauteur, entraîne une diminution de  $r_D$  et une augmentation de  $D_{2,S}$ . Avec des écrans hauts, la TR a une forte influence sur  $D_{2,S}$ , mais une emprise plutôt limitée sur  $r_D$ .



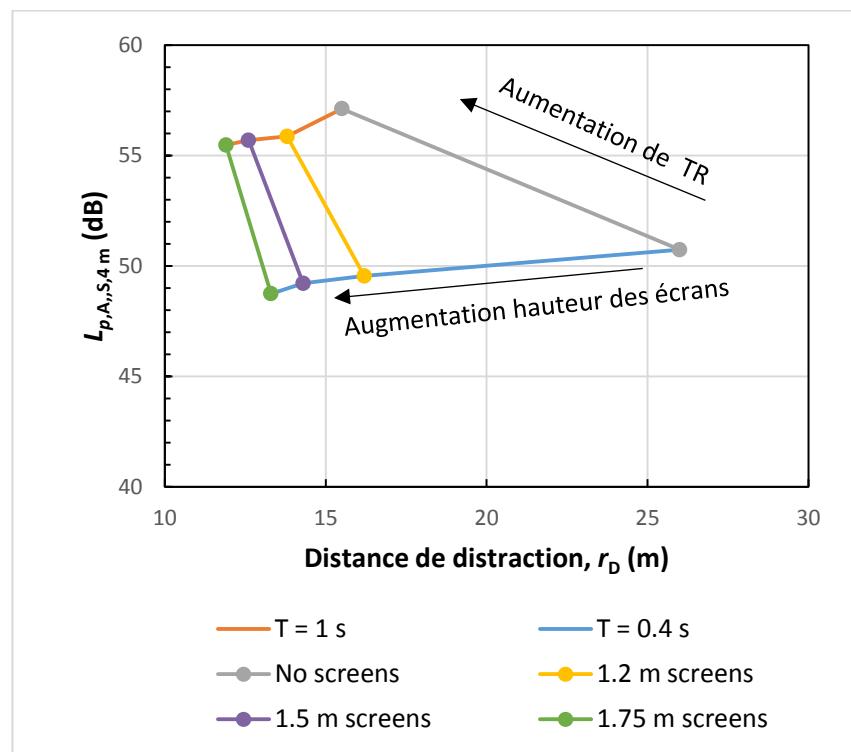
**Figure 4:** Relation entre la distance de distraction et le taux de décroissance spatiale de la parole  $D_{2,s}$ , simulations réalisées avec différents temps de réverbération (TR), avec et sans écrans. Le niveau du bruit de fond est de 35 dB avec un spectre de la parole.

La figure 5 est similaire à la figure 4, mais les résultats sont présentés pour trois niveaux de bruit de fond différents. La diminution de  $r_D$  avec l'augmentation du bruit de fond est très prononcée. Lorsque le bruit de fond est élevé en présence d'écrans, le TR n'influence que  $D_{2,s}$ , mais pas  $r_D$ .



**Figure 5:** Relation entre la distance de distraction et le taux de décroissance spatiale de la parole  $D_{2,S}$  pour différents niveaux de bruit de fond et différents temps de réverbération, avec et sans écrans.

La figure 6 montre les résultats des simulations dans un diagramme combinant les deux paramètres, distance de distraction et le niveau de pression acoustique de la parole à 4 m. L'augmentation de la hauteur des écrans est efficace pour réduire  $r_D$ , mais a une influence très limitée sur  $L_{p,A,S,4m}$ . L'augmentation du TR a une forte incidence sur  $L_{p,A,S,4m}$  et le niveau dépasse 50 dB si  $T > 0,4$  seconde dans cet exemple. Ce diagramme explique pourquoi il est nécessaire d'optimiser le temps de réverbération ; il ne devrait pas être trop long, ni trop court.



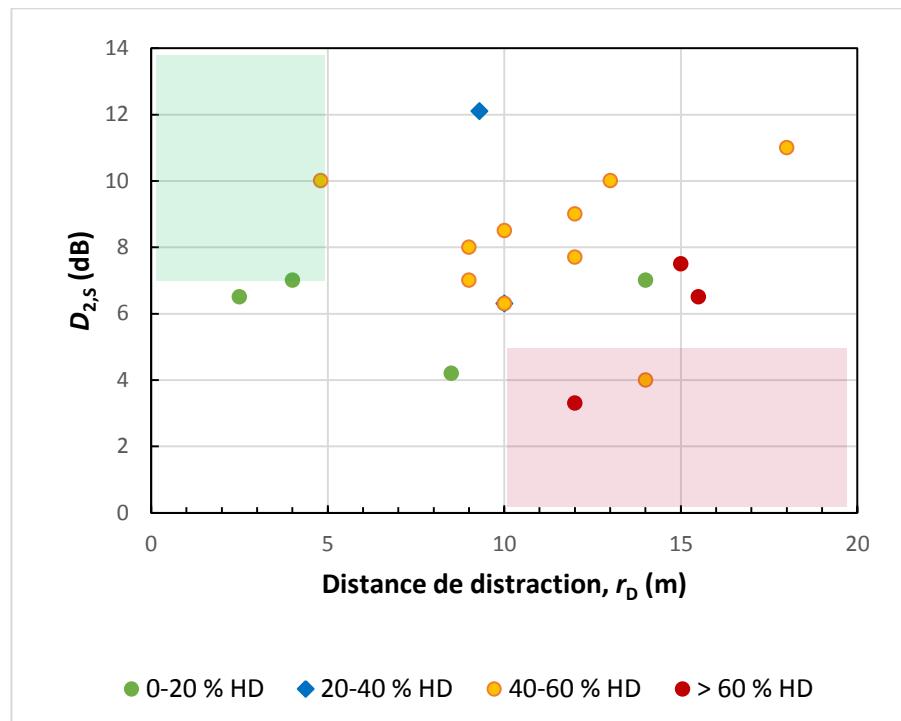
**Figure 6:** Relation entre distance de distraction et le SPL de la parole à 4 m pour des simulations avec différents temps de réverbération, avec et sans écrans. Le niveau de bruit de fond est de 35 dB avec le spectre de la parole.

## Discussion

L'annexe A de la norme ISO 3382-3 propose des lignes directrices pour l'évaluation des indicateurs acoustiques dans les bureaux paysagers. Les indicateurs sont jugés satisfaisants si  $r_D \leq 5\text{ m}$ ,  $D_{2,S} \geq 7\text{ dB}$  et  $L_{p,A,S,4m} \leq 48\text{ dB}$ . A contrario, ils sont mauvais pour  $r_D > 10\text{ m}$ ,  $D_{2,S} < 5\text{ dB}$  et  $L_{p,A,S,4m} > 50\text{ dB}$ .

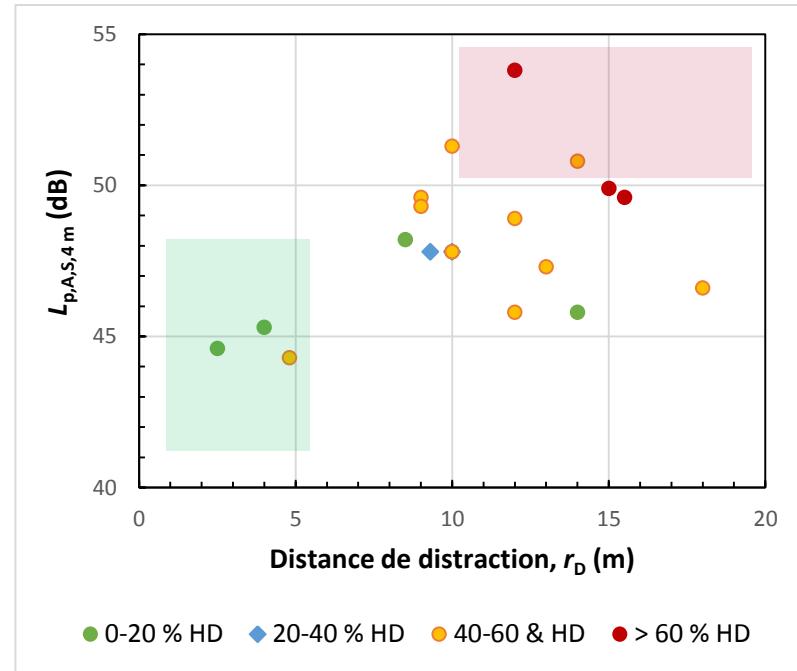
La figure 7 indique le  $D_{2,S}$  en fonction de  $r_D$ . Les données sont issues des mesures réalisées par Haapakangas et al. [7]. Le nuage de points, dépend du % HD de la parole. On remarque

que la plupart des bureaux ne sont ni mauvais ni bons, selon les directives de la norme.  $D_{2,s} > 6$  dB est observé dans la plupart des bureaux et les points sont, dans l'ensemble, dispersés. La pertinence des valeurs optimales proposées par la norme n'est pas évidente.

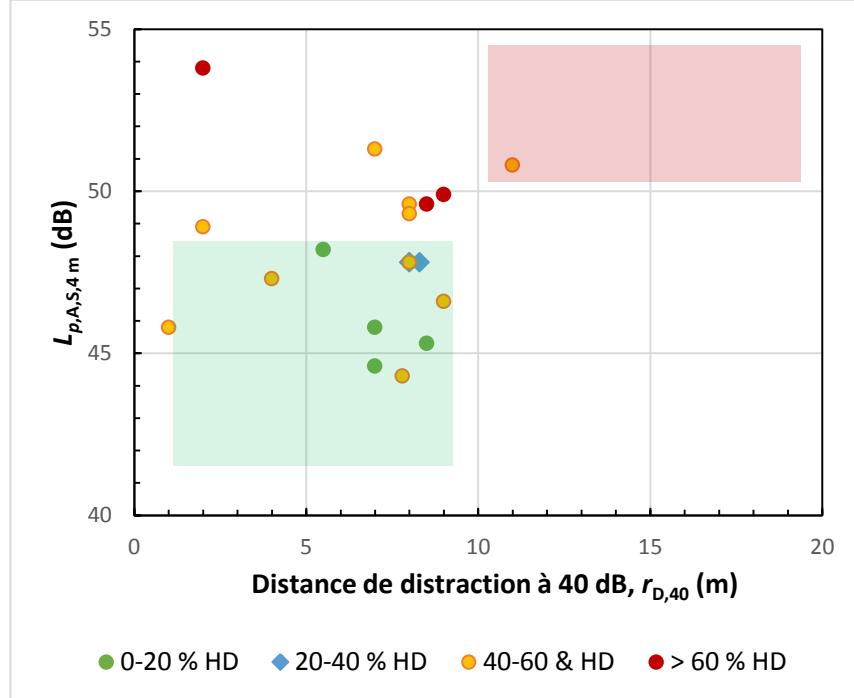


**Figure 7:** Relation entre la distance de distraction et le taux de décroissance spatiale  $D_{2,s}$ , données mesurées provenant de bureaux ouverts, Haapakangas et al. [7]. La couleur des points indique le % HD de la parole. Les zones colorées font référence à «bon» (en vert clair) et «médiocre» (en rose) selon l'annexe A de l'ISO 3382-3 [1].

Sur la figure 8, les mêmes données sont affichées dans un graphique avec  $L_{p,A,S,4\text{ m}}$  et  $r_D$  comme paramètres acoustiques. Ce diagramme a plus de sens que le précédent, car les bureaux ayant la plus mauvaise évaluation subjective ont tendance à se trouver dans le coin supérieur droit de la figure. Cependant, la corrélation entre la notation subjective et  $r_D$  n'est pas évidente non plus. Les bureaux les mieux notés (0-20% HD) ont un  $r_D$  entre 2,5 et 14 m. Cela peut être dû à un bruit de fond très différent d'un bureau à l'autre. Comme indiqué précédemment (Figure 3), il existe une corrélation assez forte entre les indicateurs  $r_D$  et le bruit de fond. En fait, certains des bureaux bien notés avaient un  $r_D$  court, mais aussi un bruit de fond assez élevé.



**Figure 8:** Relation entre la distance de distraction et le SPL de la parole à 4 m,  $L_{p,A,S,4\text{ m}}$ , données mesurées par Haapakangas et al. [7]. La couleur des points indique le % HD de la parole. Les zones colorées font référence à « bon » (vert clair) et « médiocre » (rose) selon l'annexe A de l'ISO 3382-3 [1].



**Figure 9:** Relation entre la distance de distraction ajustée avec un niveau de bruit de fond de 40 dB et le SPL de la parole à 4 m  $L_{p,A,S,4\text{ m}}$ , données mesurées par Haapakangas et al. [7]. La couleur des points indique le % HD par la parole. Les zones ombrées sont considérées pour «bonnes» (vert clair) et «médiocres» (rose)

Pour s'affranchir de cette dépendance au bruit de fond, il est conseillé de «normaliser» la distance de distraction de manière à ce qu'elle prenne en compte un bruit de fond réaliste résultant de l'activité humaine. En utilisant la droite de régression figure 3, la distance de distraction ajustée pour un bruit de fond de 40 dB provenant de la parole, noté  $r_{D,40}$ , peut être approximée par:

$$r_{D,40} \approx r_D - (40 - L_{p,A,B}) \quad (1)$$

Ceci conduit au diagramme de la figure 9. Il apparat que les conditions sont «bonnes» pour  $r_{D,40} \leq 9$  m.

Normalement, l'équation (1) ne devrait pas être utilisée. Les simulations ou calculs du STI devraient être réalisés directement à l'aide du spectre du bruit de la parole à 40 dB (pondéré A), voir la figure 1.

## En résumé

Parmi les indicateurs acoustiques, le taux de décroissance spatiale de la parole  $D_{2,S}$  semble n'avoir aucune pertinence. A contrario, le niveau de pression acoustique de la parole à 4 m et la distance de distraction sont des indicateurs adaptés. Cependant, comme la distance de distraction dépend fortement du niveau de bruit de fond, il est recommandé de «normaliser» celle-ci par rapport à un niveau de bruit de fond bien défini pouvant mieux représenter le bruit des activités humaines dans les bureaux paysagers.

*Remerciement à Jens Holger RINDEL, pour avoir autorisé et aidé à la traduction de son document.*

## Références

- [1] ISO 3382-3 (2012). Acoustique - Mesurage des paramètres acoustiques des salles - Partie 3: Bureaux ouverts. Organisation internationale de normalisation, Genève, Suisse.
- [2] I. Balazova, G. Clausen, J.H. Rindel, T. Poulsen, D.P. Wyon (2008). Open-plan office environments: A laboratory experiment to examine the effect of office noise and temperature on human perception, comfort and office work performance. Proceedings of Indoor Air 2008, 17-22 August 2008, Copenhagen, Denmark.
- [3] V. Acun & S. Yilmaz (2018). A grounded theory approach to investigate the perceived soundscape of open-plan offices. Applied Acoustics 131, 28-37.
- [4] NF S 31-199 (2016). Acoustique- Performances acoustiques des espaces ouverts de bureaux. AFNOR, Paris, France.

- [5] T. Vervoort & M. Vercammen (2015). Background noise level to determine the speech privacy in open plan offices. Proceedings of Euronoise 2015, Maastricht, Netherlands, 1209-1214.
- [6] T.S. Dehlbæk, C-H Jeong, J. Brunskog, C.M. Petersen, P. Marie (2016). The effect of human activity noise on the acoustic quality in open plan office. Proceedings of Internoise 2016, Hamburg, Germany, 3517-3526.
- [7] V. Haapakangas, V. Hongisto, M. Eerola, T. Kuusisto (2017). Distraction distance and perceived disturbance by noise – An analysis of 21 open-plan offices. *J. Acoust. Soc. Am.* 141, 127-136.
- [8] J.H. Rindel, C.L. Christensen (2012). Acoustical simulation of open-plan offices according to ISO 3382-3. Proceedings of Euronoise 2012, Prague, Czech Republic.
- [9] J.H. Rindel, C.L. Christensen, A.C. Gade (2012). Dynamic sound source for simulating the Lombard effect in room acoustic modeling software. Proceedings of Internoise 2012, New York, USA.