

Etude du démasquage par la modulation du bruit ambiant en bureau ouvert

P. Chevret et J. Chatillon
INRS, rue Morvan, 54519 Vandoeuvre Les Nancy, France
patrick.chevret@inrs.fr

L'intelligibilité des bruits de parole est l'un des principaux facteurs de gêne sonore dans les bureaux ouverts. Les études qui visent à l'évaluation objective de l'intelligibilité, au travers de l'élaboration d'un indicateur, présupposent toujours que le bruit ambiant est stationnaire. Or, des modulations de niveaux apparaissent de façon plus ou moins marquées selon la densité d'occupation de l'espace ou la répartition des personnes au sein du plateau. Ces modulations produisent un effet de démasquage qui favorise l'intelligibilité des discussions voisines. L'objet de ce papier est de présenter des résultats récents sur la sensibilité de l'intelligibilité à la présence de modulations plus ou moins marquées dans le bruit ambiant. Plusieurs indicateurs, basés sur les principes de calcul du *STI* (Speech Transmission Index), ont été développés et testés sur des sujets à l'aide d'expériences en laboratoire portant sur l'estimation du seuil de réception de la parole ou des scores d'intelligibilité. Ces expériences ont nécessité préalablement la sélection d'échantillons sonores à partir de mesures réalisées sur le terrain, dans les bureaux ouverts de différentes entreprises françaises. Le principal résultat de l'étude est que la fluctuation du bruit ambiant est un facteur qui contribue significativement à l'intelligibilité en bureau ouvert et devrait donc être intégré dans les modèles de prédiction.

1 Introduction

Il est aujourd'hui admis que le bruit est l'un des principaux facteurs de dérangement en bureau ouvert [1]. Dans la plupart des cas, cette gêne n'est pas suffisante pour empêcher totalement le salarié d'effectuer une tâche. Cependant, elle peut réduire sa satisfaction au travail [2] ainsi que ses performances lors de la réalisation de cette tâche [3]. De plus, les enquêtes réalisées en entreprise sur des salariés travaillant dans les open-spaces montrent que la gêne sonore peut avoir des conséquences sur leur santé soit parce qu'elle intervient directement comme facteur de fatigue soit indirectement comme cofacteur d'autres causes de mal-être ou de stress.

Il ressort également de ces enquêtes que même si le bruit ambiant dans un lieu de travail ouvert est constitué de sources sonores variées comme du bruit d'équipements (climatisation, imprimantes, téléphones), des bruits de pas ou des claquements de porte, la principale source de gêne est le mélange composé de paroles, issues des conversations entre collègues ou au téléphone. Dans les deux cas, c'est l'intelligibilité des messages qui constitue le facteur de dérangement des personnes. C'est pourquoi les normes internationales sur l'acoustique et l'ergonomie des bureaux [4,5] préconisent l'utilisation d'indicateurs d'intelligibilité normalisés tels que le *SII* (Speech Intelligibility Index : [6]) ou le *STI* (Speech Transmission Index: [7]). Le *SII*, tout comme l'indice d'articulation [8], repose sur l'idée que la baisse d'intelligibilité est due au masquage énergétique du signal de parole par le bruit ambiant moyen, masquage qui est décrit par le rapport signal sur bruit dans les bandes utiles de la parole. Le procédé de calcul de cet indicateur s'inspire directement des travaux de French and Steinberg [9], Fletcher et Galt [10] ou Kryter [11,12]. Le *STI*, quant à lui, s'appuie sur les travaux de Steeneken et Houtgast [13,14] qui montrent que l'intelligibilité d'un signal de parole dépend de la diminution de modulation de ce signal au travers d'un système de transmission. Cet indicateur est particulièrement adapté à la téléphonie, à l'acoustique architecturale ou à l'étude des conséquences des pertes auditives sur l'intelligibilité chez les personnes malentendantes.

Même si ces indices sont fréquemment utilisés pour l'évaluation de la qualité des espaces de travail [15,16], ils ne donnent à ce jour que des informations incomplètes. A titre d'illustration, Virjonen *et al.* [15], qui recommandent l'utilisation du *STI*, s'affranchissent de la présence des personnes dans le local puisque seul le bruit de fond constitué des équipements, dont le niveau est en général beaucoup plus faible que le bruit d'occupation, est pris en

compte. Dans ce cas, le *STI* ne fait que caractériser le potentiel d'intelligibilité du local et en aucun cas l'intelligibilité en activité. De leur côté, Bradley et Gover [16] proposent l'utilisation de spectres de bruits ambiants types. Cette approche est pertinente dans la mesure où l'on souhaite comparer des locaux entre eux pour une utilisation ou une occupation identique. Cependant, l'utilisation du spectre de bruit moyen ne suffit pas pour caractériser correctement l'intelligibilité. En effet, la présence de périodes de silence qui succèdent à des pics d'énergie dans le bruit ambiant crée un phénomène de démasquage énergétique des conversations qui favorise l'intelligibilité.

L'évaluation de ce phénomène de démasquage est un enjeu important pour les personnes qui travaillent dans les open-spaces. Rhebergen et Versfeld [17] et Rhebergen *et al.* [18] ont proposé une approche d'objectivation de ce phénomène à travers une version court terme du *SII*, qu'ils nomment *ESII* pour Extended Speech Intelligibility Index. Le principe est de définir une fenêtre d'analyse dont la taille dépend de la résolution temporelle de l'oreille humaine et d'appliquer un traitement similaire à celui de la norme ANSI S3.5-1997 [6] pour obtenir une valeur de *SII* à chaque position de la fenêtre temporelle. L'indice d'intelligibilité global est la moyenne des *SII* sur la durée du signal traité. Cooke [19] a adopté la même démarche, généralisée au domaine temps-fréquence, en définissant des « trous » dont il montre que le pourcentage d'occurrences dans un bruit ambiant a un effet direct sur l'intelligibilité des consonnes. Rhebergen *et al.* [18] parviennent à montrer que le *ESII*, décrit bien le démasquage en présence de bruit ambiant synthétique (dents de scie, sinus, sinus carré) ou de bruit de parole sauf pour les faibles modulations (4 Hz), mais les auteurs attribuent les écarts constatés à leur procédure de détermination du seuil de réception de la parole (*SRT*). Globalement, il est reproché à ces méthodes de ne pas pouvoir tenir compte de modifications non-linéaires qui pourraient être opérées par le système de transmission, telles que la compression de l'enveloppe ou la soustraction spectrale. Au-delà de cette restriction, leur principale limitation réside, de notre point de vue, dans le choix de la fenêtre d'analyse. En effet, souvent les auteurs s'appuient pour ce choix sur les résultats de Moore [20-22] mais ils conviennent de la difficulté de s'engager pour une valeur indiscutable : Rhebergen *et al.* propose une taille de 9,4 ms en basses fréquences jusqu'à 35 ms en hautes fréquences. Cependant, il précise que si l'on souhaite utiliser une taille fixe, 12 ms est un bon compromis. De son côté, George *et al.* [23], ont ajusté ces valeurs de 1,9 ms à 5,8 ms alors que Cooke [19] propose une fenêtre constante de 8 ms.

Il existe une autre famille de méthodes qui pourraient permettre d'intégrer avec davantage de précision les effets du bruit ambiant sur l'intelligibilité. Ces méthodes reposent sur l'utilisation des spectres de puissance des modulations du signal. Lors du mélange du bruit de parole avec le bruit ambiant, il apparaît des composantes de modulation additionnelles aux modulations propres du signal de parole et du bruit ambiant. Ces composantes sont dues aux interactions entre les composantes hautes fréquences des signaux porteurs. Elles sont appelées composantes parasites et se traduisent par un masquage additionnel au masquage énergétique. Ce phénomène, présent y compris pour un bruit ambiant stationnaire, n'est pas décrit par les indicateurs d'intelligibilité normalisés ou dérivés, comme ceux de Rhebergen ou Cooke. Une méthode pour sa prise en compte est celle proposée Jørgensen et Dau [24], inspirés par les travaux de Dubbelboer et Houtgast [25], qui suggèrent une modélisation à partir du calcul du spectre de puissance de l'enveloppe du signal bruité et du bruit ambiant. L'extension à un bruit ambiant fluctuant a été proposée par Jørgensen *et al.* [26] grâce à l'utilisation d'une fenêtre d'analyse sur l'enveloppe, dont la taille est inversement proportionnelle à la fréquence de modulation. L'avantage de ce type de méthodes est qu'elles sont robustes à des modifications non linéaires qui pourraient être apportées aux signaux (soustraction spectrale, compression d'enveloppe, *etc.*). Elles sont particulièrement utiles dans le cadre d'applications concernant l'appareillage des personnes malentendantes, mais ceci sort largement du cadre de cet article. Un inconvénient de ces approches est qu'elles nécessitent de connaître les formes d'onde des signaux de parole et de bruit ou bien de pouvoir établir des statistiques à partir d'un jeu de formes d'onde. Compte-tenu de cette limitation et du fait qu'elles présentent un intérêt particulier pour des opérations complexes sur les signaux, ces méthodes ne sont pas abordées dans cette étude.

Le but de ce papier est de quantifier l'effet de la modulation du bruit ambiant sur l'intelligibilité en open-space. A ce titre, nous nous sommes appuyés sur la norme IEC 60268-16 (2011) pour le calcul du *STI* en présence de bruit ambiant stationnaire et l'avons adaptée en tenant compte explicitement de la modulation du bruit ambiant qui est un descripteur physique en lien direct avec une caractéristique du local telle que la densité d'occupation. A partir de prélèvements sonores en entreprise, nous avons mis en place des tests d'intelligibilité en laboratoire afin de déterminer l'effet de la modulation ainsi que la pertinence de ce nouvel indicateur.

Dans la première partie de ce papier, nous présentons la démarche utilisée pour le développement d'un nouvel indicateur d'intelligibilité utilisable en open-space. Dans la seconde partie, nous confrontons cet indicateur à des données de bruits ambiants mesurés en entreprise. Ceci nous permet de quantifier clairement le rôle de démasquage joué par la modulation du bruit ambiant.

2 Développement d'un indicateur d'intelligibilité pour les open-spaces

Le nouvel indicateur d'intelligibilité développé pour les open-spaces repose sur l'idée que l'intelligibilité est favorisée par la présence de périodes de silence de quelques dizaines de millisecondes dans le signal de masquage et

que la fréquence d'apparition de ces silences est directement liée au taux de modulation. Nous nous sommes donc appuyés sur la démarche de Steeneken et Houtgast [13] qui consiste à déterminer la fonction de transfert de modulation liée à la perturbation du signal de parole. Dans le cas d'un bruit ambiant stationnaire, la fonction de transfert de modulation, qui est le rapport de la modulation finale sur la modulation initiale du signal de parole, s'écrit simplement :

$$m(F) = \frac{1}{1 + 1/SNR^{lin}}$$

Où SNR^{lin} est le rapport de l'intensité du signal de parole sur celle du bruit ambiant, soit I_S/I_N .

Dans le cas d'un bruit ambiant modulé, le démasquage apporté par les périodes de silence peut être majoré en remplaçant le niveau moyen par la valeur minimale atteinte par l'enveloppe du signal de bruit ambiant à la fréquence de modulation F . En faisant cette hypothèse, nous faisons le choix de maximiser l'intelligibilité, ce choix étant dicté par la volonté de considérer la pire des situations et ainsi, de fournir aux préventeurs en entreprise des valeurs cibles visant à protéger les salariés contre la nuisance sonore que constitue l'intelligibilité provoquée par les fluctuations du bruit ambiant. De ce fait,

$$I_N^{eq}(F) = I_N^{min}(F) = \bar{I}_N \times (1 - m_N(F))$$

Où $m_N(F)$ est le taux de modulation à la fréquence F . D'après cette expression, lorsque la modulation du bruit ambiant est égale à 0, l'intensité du bruit ambiant équivalent est égale à l'intensité moyenne ; lorsque la modulation vaut 1, l'intensité du bruit ambiant équivalent est égale à 0, l'intelligibilité est totale : tout se passe donc comme si le signal de parole et le bruit ambiant étaient déphasés d'un demi cycle, permettant une écoute du signal de parole dans les trous du bruit ambiant, même pour des rapports signal sur bruit très faibles comme illustré sur la figure 1. De ce fait, le rapport signal sur bruit apparent qui tient compte de la modulation du bruit ambiant s'écrit simplement :

$$SNR_{app}(F) = SNR(F) - 10 \times \log(1 - m_N(F))$$

SNR est le rapport signal sur bruit lorsque le bruit ambiant est stationnaire. Le second terme, $\Delta_m = -10 \times \log(1 - m_N(F))$, correspond directement au démasquage par la modulation du bruit. Lorsque la modulation du bruit ambiant est nulle, ce terme est nul également et le SNR_{app} est égal au SNR . On se retrouve alors dans la situation d'un signal de parole masqué par un bruit ambiant stationnaire. A contrario, lorsque la modulation du bruit ambiant tend vers 1, la pénalité constituée par le terme de démasquage tend vers l'infini, entraînant le rapport signal sur bruit apparent vers l'infini. En pratique, on le majorera par la valeur 15 dB, valeur pour laquelle on considère que l'intelligibilité maximale est atteinte.

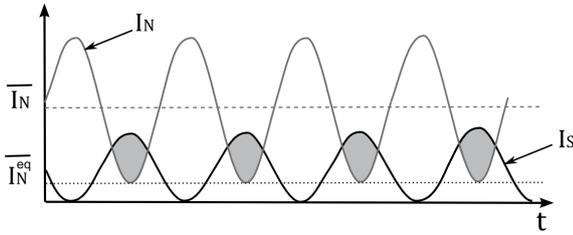


Figure 1. Illustration de l'écoute dans les trous en présence de bruit ambiant modulé. I_s et I_N représentent respectivement l'intensité du bruit de parole et du bruit ambiant.

La démarche de calcul d'un nouvel indicateur d'intelligibilité (STI_m) tenant compte de la modulation du bruit ambiant consiste, dans un premier temps, à évaluer le rapport signal sur bruit apparent $SNR_{app}(F)$ à partir de l'estimation de la modulation $m_N(F)$. Puis, à calculer l'indice d'intelligibilité conformément à la norme définissant le STI (IEC 60268-16, 2011) ; cette procédure étant à appliquer pour chaque valeur de la fréquence de modulation F prise dans les bandes tiers d'octave de 0,63 Hz à 12,5 Hz. Le résultat final est égal à la moyenne des $STI_m(F)$ de chaque bande.

Cependant, la fréquence de modulation de 4 Hz, correspondant approximativement au nombre moyen de syllabes débitées par seconde au cours d'une allocution sans contrainte, joue un rôle très spécifique dans les mécanismes de l'audition. Pour cette raison, nous avons restreint l'étendue de calcul du $STI_m(F)$ à cette fréquence particulière. Le procédé de calcul du STI_m est détaillé sur la figure 2.

2.1 Valeurs de STI_m en open-space

Plusieurs campagnes de mesures de bruit ambiant réalisées en open-spaces ont permis de collecter des dizaines d'heures d'échantillons sonores. Ces enregistrements ont été découpés en échantillons de 5 secondes, ce qui nous permet de disposer d'environ 25000 échantillons sonores d'ambiance d'open-space.

A titre d'exemple, nous avons présenté sur la figure 3 les valeurs moyennes de STI_m pour 9 open-spaces. Chaque point représente la valeur moyenne pour une position microphonique dans l'espace et les barres d'erreur représentent les écart-types pour la totalité de l'enregistrement à cette même position. Les valeurs de STI_m ont été calculées en considérant que le rapport signal sur bruit moyen dans chaque bande d'octave est égal à -5.9 dB, valeur qui correspond au SRT pour un bruit ambiant stationnaire [27], donc que le STI est égal à 0,3. Ainsi, selon cette hypothèse, un STI_m égal à 0,3 correspond à un bruit ambiant dont le niveau est supérieur de 5,9 dB par rapport à celui du signal cible. Et, un STI_m égal à 1 correspond à une modulation de 100% pour un même rapport signal sur bruit. Les valeurs de STI_m ne peuvent donc être inférieures à 0,3 dans ce cas.

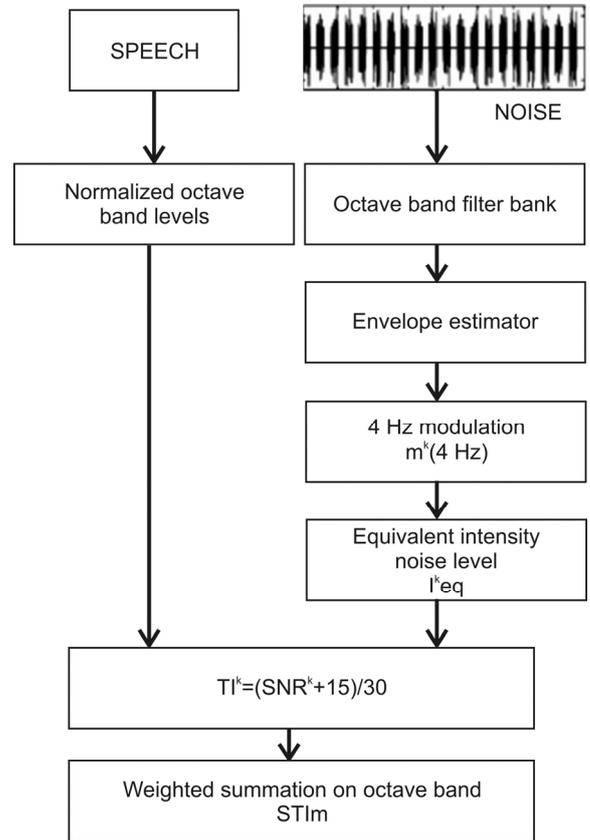


Figure 2. Procédé de calcul du STI_m

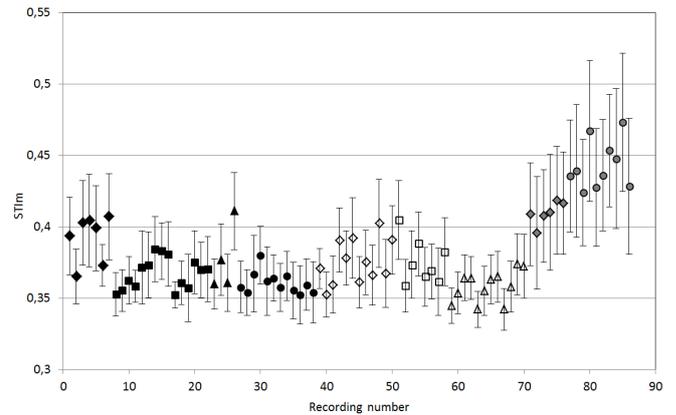


Figure 3. Valeurs moyennes et écart-types de STI_m pour 9 open-spaces

3 Tests en laboratoire

Afin d'évaluer la sensibilité de l'intelligibilité à ce nouvel indice, des tests en laboratoire ont été réalisés à partir d'un échantillon de personnes sélectionnées, auxquelles il a été présenté un ensemble de phrases cibles pour des conditions d'ambiances sonores correspondant à 4 valeurs de STI_m . Après le calcul des scores d'intelligibilité pour chaque catégorie, il a été possible de déterminer le degré de pertinence de l'indicateur.

3.1 Matériel sonore

Les signaux cibles sont constitués de plusieurs listes de phrases phonétiquement équilibrées (phrases de

Combescur, Founier et HINT). On dispose d'un total de 299 phrases lues par un homme. Les bruits ambiants de masquage sont constitués uniquement d'enregistrements sonores réalisés en open-space. Ces enregistrements ont été découpés en échantillons de 5 secondes à partir desquels ont été calculées les valeurs de STI_m . Une écoute préalable au test a permis d'établir 4 catégories correspondant aux valeurs $STI_m = [0,35 \ 0,40 \ 0,45 \ 0,50]$ ($\pm 0,05$ pour chaque catégorie) d'échantillons composés principalement de bruits de parole. Ainsi, vingt échantillons par catégorie ont été retenus.

3.2 Conditions de test

61 personnes, âgées de 19 à 62 ans, ont été sélectionnées pour les tests. Toutes les personnes ont déclaré ne pas avoir de problèmes d'audition connus. Les tests ont été réalisés dans une chambre semi-anéchoïque. Pendant les tests, les personnes étaient placées à 1,5 m en face d'un haut-parleur, diffusant les échantillons sonores composés du mélange de signal de parole et de bruits ambiants. Le niveau des échantillons sonores était calibré de façon à être égal à 60 dB à 1 m de la source.

3.3 Procédure

Chaque sujet sélectionné est soumis au test de la façon suivante : l'ordre de passage des huit conditions de test est tiré aléatoirement. Pour chaque condition, 20 phrases (2 listes de 10 phrases équilibrées) sont sélectionnées, auxquelles on superpose l'un des échantillons de bruit ambiant dans la liste associée à la condition. L'ordre de passage des listes est tiré aléatoirement. Rappelons que les tests SRT dans un bruit ambiant stationnaire ont conduit à une valeur de -5,9 dB. Afin d'optimiser la dynamique de l'indice de modulation, le rapport signal sur bruit choisi est égal à -6 dB, soit un STI égal à 0,3.

Les réponses des personnes sont enregistrées puis un comptage des mots justes est effectué. Le score d'intelligibilité pour chaque phrase correspond au pourcentage de mots justes (sans pondération selon la difficulté éventuelle du mot).

3.4 Analyse des résultats

Les résultats des scores d'intelligibilité sont donnés par les symboles sur la figure 4 qui représente le score (en %) en fonction de l'indicateur d'intelligibilité. Les intervalles de confiance sont également fournis au travers des barres d'erreur. La courbe représente la loi de régression de la fonction logistique :

$$p(STI) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{M - STI}{S}\right)}$$

Cette loi est calculée à partir des valeurs de score à STI_m égal à 0,35 ; 0,40 ; 0,45 ; 0,50 et 0,3 qui est la valeur pour laquelle on a un score de 50 % ($SNR = -5.9$ dB d'après le test SRT dans un bruit ambiant stationnaire). Cette valeur est représentée par la croix sur la figure 4. Le calcul des régressions donne les valeurs $S = 0.12$, $M = 0.28$ et $SRT = -6.6$ dB. Le coefficient de détermination associé à cette régression est égal à 0,94 (régression linéaire de la loi

$\log(p/1 - p) = a \times STI + b$). La valeur de SRT obtenue sous-estime la valeur de -5,9 dB (std = 0,5 dB) obtenue lors du test précédent ce qui sous-entendrait que le descripteur tend à minimiser le rôle joué par les fluctuations du bruit ambiant.

Une analyse statistique de type ANOVA à un facteur portant sur les quatre conditions de STI_m montre néanmoins que l'indicateur exerce un effet significatif sur l'intelligibilité. En effet, on obtient $F(3,240) = 60,32$, soit $p < 0,0029$.

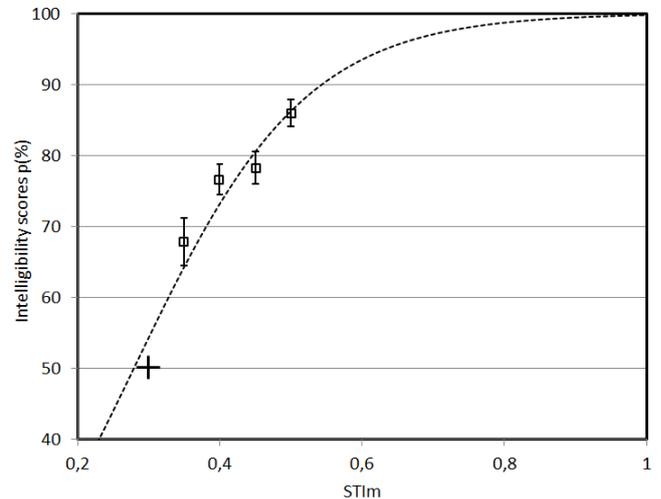


Figure 4. Scores d'intelligibilité en fonction du STI_m et régressions de la fonction logistique

4 Conclusion

L'intelligibilité des conversations en open-space est l'un des principaux facteurs de gêne au travail. Elle est en général évaluée au moyen d'indicateurs normalisés qui utilisent des informations sur le local (réponse impulsionnelle) ou sur le bruit ambiant (niveau moyen), mais qui font l'hypothèse que ce dernier est stationnaire. Or, selon la densité d'occupation de l'espace de travail, il peut être plus ou moins fluctuant, favorisant ainsi le phénomène de démasquage qui s'explique en grande partie par une écoute des conversations dans les « trous ». C'est l'objet de la présente étude que de quantifier l'effet de ces fluctuations sur l'intelligibilité. Pour cela, un nouvel indicateur d'intelligibilité (STI_m) basé sur les développements du STI a été mis en place, son originalité étant de tenir compte explicitement du taux de modulation à 4 Hz du bruit ambiant. Des tests en laboratoire, basés sur la détermination de scores d'intelligibilité pour des bruits ambiants enregistrés en open-space, a été conduite. Ces tests ont montré que le STI_m est un bon indicateur de l'intelligibilité et surtout que la modulation du bruit ambiant est un facteur qui contribue significativement au démasquage des signaux de parole.

Références

- [1] SBiB (2010) Enquête Suisse dans les bureaux, Haute Ecole de Lucerne.
<http://www.seco.admin.ch/dokumentation/publikation/00008/00022/04153/index.html?lang=fr> (visible le 7 mars 2014).
- [2] Leather, P., Beale, D. and Sullivan, L. (2003) "Noise, psychosocial stress and their interaction in the workplace," *Journal of Experimental Psychology*, 23, 391-397.
- [3] Beaman, P. (2005) "Auditory Distraction from Low-Intensity Noise: A review of the consequences for learning and workplace environments." *App. Cognitive Psych.*, 19, 1041-1064.
- [4] ISO 3382-3 (2012) Acoustics - Measurement of room acoustic parameters - Part 3: Open plan offices. International Organization for Standardization.
- [5] ISO/DIS 24504 (2013). "Ergonomics - Accessible design - Sound pressure levels of spoken announcements for products and public address systems." International Organization for Standardization.
- [6] ANSI S3.5-1997 (1997) "American National Standard Methods for calculation of the speech intelligibility index." American National Standard Institute.
- [7] IEC 60268-16 (2011) "Sound system equipment. Part 16: Objective rating of speech intelligibility by speech transmission index." International Electrotechnical Commission.
- [8] ANSI S3.5-1969 (1969) "American National Standard Methods for the calculation of the articulation index." American National Standard Institute.
- [9] French, N. R. and Steinberg, J. C. (1947) "Factors governing the intelligibility of speech sounds," *J. Acoust. Soc. Am.*, 19, 90-119.
- [10] Fletcher, H. and Galt, R. H. (1950) "The perception of speech and its relation to telephony." *J. Acoust. Soc. Am.*, 22, 89-151.
- [11] Kryter, K. D. (1962a) "Methods for the calculation and use of the Articulation Index," *J. Acoust. Soc. Am.*, 34, 1689-1697.
- [12] Kryter K. D. (1962b) "Validation of the Articulation Index." *J. Acoust. Soc. Am.*, 34: 1698-1702.
- [13] Steeneken H.J.M. and Houtgast T. (1980) "A physical method for measuring speech-transmission quality," *J. Acoust. Soc. Am.* 67(1), 318-326.
- [14] Steeneken, H. J. M. and Houtgast, T. (1999) "Mutual dependency of the octave-band weights in predicting speech intelligibility," *Speech Communication*, 28, 109-123.
- [15] Virjonen, P., Keränen, P., and Hongisto, V. (2009). "Determination of acoustical conditions in open-plan offices – proposal for new measurement method and target values," *Acta Acust. Unit Acust.* 95(2), 279-290.
- [16] Bradley, J. S. and Gover, B. N. (2004) "Criteria for acoustic comfort in open-plan offices." *Inter-Noise 2004 – The 33rd International Congress and Exposition on Noise Control Engineering*, Prague, Czech Republic, 1-6.
- [17] Rhebergen, K. S. and Versfeld, N. J. (2005) "A speech intelligibility index-based approach to predict the speech reception threshold for sentences in fluctuating noise for normal-hearing listeners," *J. Acoust. Soc. Am.*, 117(4), 2181-2192.
- [18] Rhebergen, K. S., Versfeld N. J. and Dreschler, W. A. (2006) "Extended speech intelligibility index for the prediction of the speech reception threshold in fluctuating noise," *J. Acoust. Soc. Am.*, 120(6), 3988-3997.
- [19] Cooke, M. (2006). "A glimpsing model of speech perception in noise," *J. Acoust. Soc. Am.* 119(3), 1562-1573.
- [20] Moore, B. C. J., Glasberg, B. R. Plack, C. J., and Biswas, A. K. (1988). "The shape of the ear's temporal window," *J. Acoust. Soc. Am.* 83, 1102-1116.
- [21] Moore, B. C. J., Peters, R. W. and Glasberg, B. R. (1993) "Detection of temporal gaps in sinusoids: Effects of frequency and level," *J. Acoust. Soc. Am.* 93, 1563-1570.
- [22] Moore, B. C. J. (1997) "An introduction to the psychology of hearing," 4th ed. (Academic, London).
- [23] George, E. L. J., Festen, J. M. and Houtgast, T. (2006) "Factors affecting masking release for speech in modulated noise for normal-hearing and hearing-impaired listeners." *J. Acoust. Soc. Am.* 120(4), 2295-2311.
- [24] Jørgensen, S., and Dau, T. (2011). "Predicting speech intelligibility based on the signal-to-noise envelope power ratio after modulation-frequency selective processing," *J. Acoust. Soc. Am.* 130(3), 1475-1487.
- [25] Dubbelboer, F. and Houtgast, T. (2008). "The concept of signal-to-noise ratio in the modulation domain and speech intelligibility," *J. Acoust. Soc. Am.* 124, 3937-3946.
- [26] Jørgensen, S., Ewert, S. D. and Dau, T. (2013) "A multi-resolution envelope-power based model for speech intelligibility," *J. Acoust. Soc. Am.* 134(1), 436-446.
- [27] Chevret, P., Ebissou, A., and Parizet, E. (2012) "Evaluation of speech intelligibility in open-plan offices," *INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings*, 6, 5532-5544, Institute of Noise Control Engineering