

# CFA/VISHNO 2016

## Caractérisation de l'influence des PICB sur l'intelligibilité de la parole

C. Lambourg<sup>a</sup>, P. Peyret<sup>a</sup>, F. Dubois<sup>b</sup> et J.P. Gettliffe<sup>c</sup>

<sup>a</sup>GENESIS, Domaine du Petit Arbois BP69, 13545 Aix En Provence Cedex 04, France

<sup>b</sup>SNCF - Direction Innovation et Recherche, 40, avenue des Terroirs de France, 75611 Paris, France

<sup>c</sup>SNCF - Agence d'Essai Ferroviaire, 21, avenue du Président Allende, 94400 Vitry-Sur-Seine, France

[christophe.lambourg@genesis.fr](mailto:christophe.lambourg@genesis.fr)



LE MANS

Pour améliorer les conditions de travail et de sécurité des cheminots, la SNCF et Genesis ont mené une étude concernant l'influence du port de Protecteurs Individuels Contre le Bruit (PICB) sur la compréhension des messages de sécurité dans des situations de forte exposition au bruit et de risque ferroviaire. Dans ce cadre, un test d'intelligibilité sur listes pseudo-ouvertes a été réalisé en laboratoire sur un panel d'agents SNCF normaux entendant, dans le but de comparer les scores obtenus avec et sans PICB dans différentes situations métier (intervention sur les voies, communication radio en cabine de conduite, agent à quai en gare). Deux modèles de PICB de types « bouchons moulés » et « casque circum-aural » ont été évalués. Des listes de mots équilibrées phonétiquement ont été constituées à partir d'un corpus de mots métier SNCF et de mots du vocabulaire courant, en appliquant un algorithme d'optimisation par tri génétique. Le test consistait à faire écouter sur enceintes les mots dictés par plusieurs locuteurs, filtrés et calibrés en niveau en fonction du mode de communication de la situation étudiée, et mixés avec un bruit stationnaire correspondant à l'environnement de travail des agents. La génération des stimuli, le recueil des réponses des sujets, leur traduction phonétique et le calcul des scores d'intelligibilité ont été effectués à l'aide du logiciel GeneINTEL. Dans toutes les configurations testées, qui correspondent à un large éventail de niveaux sonores, le port du PICB ne dégrade pas l'intelligibilité. Dans plusieurs configurations testées, il permet même d'améliorer de façon significative les scores de mots reconnus.

les différentes situations métiers qui ont été étudiées. Le paragraphe 3 présente les résultats obtenus.

## 1 Introduction

La problématique du bruit au poste de travail est un sujet traité depuis de nombreuses années à la SNCF. Cependant, les textes réglementaires ont toujours interdit le port de protecteurs auditifs (PICB) lorsque les travailleurs étaient en risque ferroviaire (risque de heurt par un train).

Aujourd'hui, les évolutions techniques des protecteurs auditifs ont amené la SNCF à remettre en cause le dogme de non-port de PICB en risque ferroviaire et à rechercher des solutions compatibles avec la perception de signaux sonores ou de la parole. Cet article se concentre sur l'influence du port de PICB sur les performances d'intelligibilité de messages de sécurité.

Les premières études sur l'intelligibilité de la parole ont été menées au sein des Bell Labs, dès le début du XXe siècle, dans le but de mieux comprendre l'influence de la bande passante du téléphone et du bruit sur l'intelligibilité. En 1947, ces travaux ont abouti à la publication de la description du premier indicateur calculé (AI, *Articulation Index*) par French et Steinberg [1]. L'AI permet de prédire l'intelligibilité de la parole à partir de son spectre et de celui du bruit masquant, en tenant compte du seuil d'audibilité des sons purs, et des effets de masquage simultané. A la même période, Kryter s'intéresse pour la première fois à l'effet des Protection Individuelles Contre le Bruit (PICB) sur l'intelligibilité des communications parlées [2].

Depuis lors, de nombreux travaux de recherche ont été menés sur ce sujet [3], [4], [5], [6], [7]. Ces études montrent que le port de PICB tend à dégrader l'intelligibilité pour des niveaux de parole faibles (inférieurs à environ 60 dB(A), et peut en revanche l'améliorer significativement pour des niveaux sonores élevés (supérieurs à 80 dB(A) environ).

Cependant, à l'heure actuelle, il semble qu'aucun modèle du système auditif ne permette de prédire de manière satisfaisante l'effet d'un PICB à partir de ses indices d'atténuation, et des caractéristiques du bruit et de la parole.

Pour vérifier que le port de PICB n'entrave pas la communication dans les situations de risque ferroviaire, il s'est donc avéré indispensable de réaliser des mesures directes d'intelligibilité par test d'écoute, compte tenu du manque d'indicateurs objectifs fiables.

Dans la suite cet article, le paragraphe 2 présente la méthode expérimentale qui a été suivie pour cette étude. Il décrit le protocole de test d'écoute mis en œuvre ainsi que

## 2 Méthode expérimentale

### 2.1 Protocole de test

Le test s'est déroulé en laboratoire, dans les locaux de l'Agence d'Essais Ferroviaire. Au cours de cette expérience, les sujets sont placés dans des environnements sonores correspondant à différentes situations métier (voir paragraphe 2.5). Pour chacune d'elles, l'intelligibilité de la parole est évaluée sans PICB, et avec deux types de PICB (voir paragraphe 2.4).

Un protocole normalisé sur listes pseudo-ouvertes avec choix libre a été retenu pour évaluer l'intelligibilité de la parole [8]. Ce test consiste à faire écouter aux sujets des mots isolés précédés d'une phrase porteuse destinée à attirer leur attention (par exemple : « Notez le mot ... »). Les sujets doivent saisir le mot qu'ils ont reconnu sur un formulaire informatique.

Pour chaque configuration, la tâche est répétée pour une trentaine de mots tirés d'une liste inconnue *a priori* du sujet. L'analyse consiste à calculer le pourcentage de mots ou de phonèmes correctement reconnus pour chaque liste.

Ce type de test a été préféré à un test de rimes à choix forcé [8], car il permet de mieux discriminer les configurations correspondant à des forts niveaux d'intelligibilité. Il nécessite en revanche une étape supplémentaire de traduction phonétique des réponses des sujets, pour éviter de prendre en compte les erreurs d'orthographe dans les scores de mots ou de phonèmes reconnus.

### 2.2 Matériel phonétique utilisé

La réussite du test dépend fortement du matériel phonétique utilisé : les listes de mots doivent être représentatives du vocabulaire utilisé dans les situations que l'on cherche à évaluer. Elles doivent être d'égale difficulté, c'est-à-dire, donner des scores identiques pour une même configuration, et phonétiquement équilibrées, c'est-à-dire présentée des proportions équivalentes de phonèmes. D'autre part, chaque liste ne peut être présentée qu'une

seule fois à chacun des sujets pour limiter le phénomène d'apprentissage.

Pour cette expérience, 8 listes de 30 mots ont été constituées à partir d'un corpus initial de 208 mots métiers SNCF, complété par 32 mots tirés des listes de mots dissyllabiques de Fournier (corpus initial de 295 mots) [9]. Un algorithme d'optimisation par tri génétique [10] a été utilisé pour effectuer cette sélection, en minimisant un critère de mérite prenant en compte les écarts entre les distributions de phonèmes, la proportion de mots courts (< 4 phonèmes) et de mots longs ( $\geq 5$  phonèmes), et la proportion de voyelles et de consonnes dans les différentes listes.

Les mots ont été enregistrés en studio par un locuteur professionnel de sexe masculin. Afin de reproduire l'effet Lombard<sup>1</sup> et la modification du spectre de voix associée, ces enregistrements ont été réalisés pour deux efforts vocaux différents du même locuteur (voix normale, voix forte).

### 2.3 Dispositif expérimental

Les tests se sont déroulés dans une salle isolée et traitée en absorption. Les stimuli sont diffusés à l'aide d'une enceinte frontale et d'un caisson de basses, égalisés et calibrés en niveau au point d'écoute. Ce dispositif permet d'évaluer l'influence de n'importe quel type de PICB, et a également été utilisé dans le cadre d'une étude sur la perception des alarmes, présentée dans un article conjoint.



Figure 1 : salle d'écoute pour le test

La génération des signaux, la saisie des réponses des sujets, et leur traduction phonétique ont été effectuées à l'aide du logiciel GeneINTEL développé par GENESIS.

### 2.4 PICB évalués

Dans le cadre de cette étude, deux modèles de PICB ont été évalués ; un Casque Anti-Bruit de type circum-aural (CAB) et une paire de Bouchons Moulés Individuels (BMI). Les BMI ont été au préalable moulés spécifiquement pour chacun des participants au test. Les atténuations moyennes des deux modèles de PICB étudiés sont données dans le Tableau 1.

Tableau 1 : Atténuations moyennes des PICB évalués (valeurs fournis par les constructeurs)

<sup>1</sup> Modification spontanée de l'effort vocal pour un locuteur soumis à un niveau de bruit ambiant élevé.

Fréquence (Hz)	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Mf BMI (dB)	-	10,8	12,8	17	17,9	22,9	23,5	17,5
Mf CAB (dB)	12,6	15,7	23,9	27,8	23,3	25,8	29	31

## 2.5 Description des situations métiers

Quatre situations métier comportant à la fois un risque ferroviaire et un risque d'exposition au bruit ont été sélectionnées par la SNCF :

- La situation I correspond à un agent posté à quai à proximité d'une ventilation de motrice de TGV, et communiquant de vive voix avec des usagers.
- La situation II correspond à un agent de conduite en cabine d'une locomotive de type BB15000, écoutant un message diffusé par le poste de radio (haut-parleur dans le tableau bord).
- La situation III correspond à un agent de conduite dans une cabine de draine de type DU65 écoutant un message diffusé par le poste de radio à bord.
- La situation IV correspond à un agent de maintenance des infrastructures situé sur les voies, communiquant de vive voix.

Les stimuli sont générés en filtrant les phrases porteuses et les mots tests enregistrés en studio pour modéliser le canal de transmission entre le locuteur et l'auditeur (communication de vive voix ou transmission radio), puis en les mixant avec un bruit stationnaire représentatif de l'environnement de travail (extrait d'enregistrements ou synthèse à partir d'un spectre).

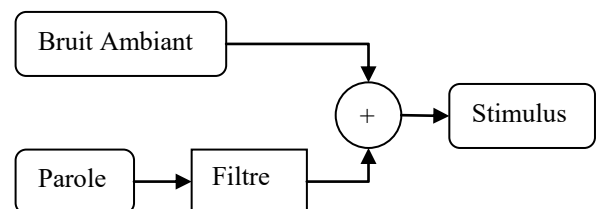


Figure 2 : Principe de la génération des stimuli

Le tableau ci-dessous décrit les filtres et bruits ambiants utilisés pour chaque situation.

Tableau 2 : Situations métier étudiées

Situation métier	Filtrage de la voix	Type de bruit	
I	Agent sur le quai	Aucun	Ventilation motrice TGV
II	Conducteur train	Réverbération cabine BB15000 + filtrage « radio » (300-3kHz)	Cabine de conduite BB15000
III	Conducteur DU65	Réverbération cabine Y7000 + filtrage « radio » (300-3kHz)	Cabine de conduite DU65
IV	Agent Infra en intervention sur les voies	Aucun	Recul de train (Refolement)

La Figure 3 représente les spectres de bruit de fond.

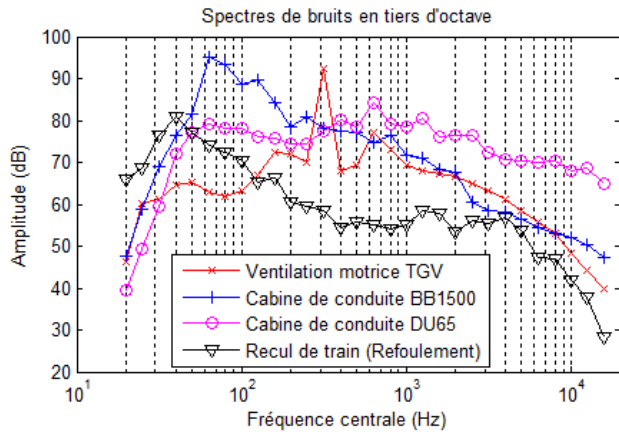


Figure 3 : Spectres en tiers d'octave des bruits utilisés pour les tests d'intelligibilité.

Pour déterminer les filtres qui correspondent aux situations métier II et III, des mesures de réponses acoustiques entre une enceinte à la position du haut-parleur radio et un microphone à l'emplacement du conducteur ont été réalisées dans les deux cabines de conduite (BB15000 et Y7000). Afin de prendre en compte la réduction de bande passante inhérente à la transmission radio, ces réponses ont ensuite été filtrées par un filtre passe-bande de fréquences de coupure 300 et 3000 Hz.

## 2.6 Panel de sujets

Au total, 112 sujets parlant couramment français ont été recrutés au sein du personnel de la SNCF pour participer à l'expérience. Les sujets appartenaient aux différents corps de métier correspondant aux situations testées.

Chaque participant a effectué au préalable un test audiométrique, pour identifier les éventuelles déficiences auditives. Dans le cadre de cette étude, seuls ont été retenus les sujets dont la moyenne de pertes auditives à 500, 1000, 2000 et 4000 Hz ne dépasse pas 20 dBHL (correspondant à la définition d'une « audition normale » selon [11])

## 2.7 Plan d'expérience

Pour chacune des 4 situations métier décrites précédemment, 3 niveaux de paroles différents (pour un niveau de bruit constant) ont été étudiés, soit 12 configurations au total. Les niveaux de parole et de bruit sont présentés dans le Tableau 3.

Les niveaux moyens de parole sont compris entre 58 dB(A) (conversation de vive voix avec un effort vocal normal) et 93.8 dB(A) (voix diffusée par la radio) qui correspond à un niveau de parole très élevé. Ils ont été choisis au cours d'un pré-test, pour englober un large éventail de degrés de dégradation de l'intelligibilité.

Les 12 situations étudiées ont été évaluées chacune pour 3 modalités différentes de PICB (présentées dans le Tableau 4) représentant **au total 36 configurations de test**. Dans la suite de ce document, les configurations de test sont indiquées par le numéro de la situation suivie de la lettre correspondant à la modalité de PICB associée à cette configuration (e.g. 4B correspondant à la situation 4 (conducteur de train avec un RSB de -5dB) avec un PICB type BMI).

Tableau 3 : Liste de situations testées

N°	Situation Métier	Niveau de Bruit dB(A)	Niveau de Parole dB(A)	Effort Vocal	RSB dB(A)
1	I	86.0	73.0	Normal	-13
2			77.0		-9
3			80.0	Fort	-6
4	II	83.8	78.8	Normal	-5
5			83.8		0
6			88.8		5
7	III	88.8	83.8		-5
8			88.8		0
9			93.8		5
10	IV	68.0	58.0		-10
11			63.0		-5
12			68.0		0

Tableau 4 : Modalités de PICB étudiées

Modalité PICB	A	B	C
PICB porté	Aucun	BMI	CAB

Pour éviter les effets d'apprentissage, chaque sujet a évalué une seule fois les 8 listes de mots, chacune associée à une configuration dans l'une ou l'autre des modalités de PICB (A, B ou C). Pour des raisons pratiques, les 3 modalités de PICB n'ont pas pu être évaluées systématiquement par le même sujet.

Le plan d'expérience a été construit de façon à ce que chaque configuration soit évaluée le même nombre de fois sur chaque liste. Finalement, chaque configuration de test a été évaluée au minimum 24 fois par des sujets différents et de façon homogène sur les différentes listes (en moyenne 3 évaluations pour chacune des 8 listes de mots).

La durée totale nécessaire pour qu'un sujet évalue une configuration sur une liste a été estimée à 5 minutes ce qui représente environ 40 minutes par session de test.

## 3 Résultats et analyse

Pour chaque évaluation et chaque configuration, les scores de mots et de phonèmes ont été calculés automatiquement par le logiciel GeneINTEL. Les résultats des tests d'intelligibilité utilisés pour l'analyse se présentent sous la forme de pourcentages de mots correctement reconnus pour chaque évaluation.

Tout d'abord, le score moyen de mots reconnu a été calculé en moyennant les scores individuels obtenus pour chaque configuration. Puis, pour chaque situation de test, les différences de scores obtenus entre les configurations avec PICB (modalité C ou B) et sans PICB (modalité A) ont été calculés. Une série de tests de Student appariés a permis d'identifier les situations pour lesquelles le port d'un type de PICB particulier (B ou C) avait un effet significatif sur l'intelligibilité. Le Tableau 5 résume les résultats obtenus. Les différences significatives sont indiquées en gras.

On peut noter tout d'abord des écarts importants entre les scores de mots obtenus sans PICB, allant de 10 % à 75% des mots (correspondant respectivement à une « intelligibilité mauvaise » et une « intelligibilité correcte » selon la terminologie de la norme ISO9921 [12]).

Pour toutes les situations étudiées, aucune dégradation significative de l'intelligibilité par le port de PICB n'est observée. Pour certaines configurations (4C, 5B, 5C, 6B,



6C, 10B, 10C, 11B, 11C, 12B, 12C), le port de PICB permet même d'améliorer de manière significative l'intelligibilité (avec une augmentation maximum effective du pourcentage de mots de 31 points pour la configuration 5B).

*Tableau 5 : Résultats des tests: Scores de mots (les configurations en gras correspondent à une influence significative du PICB).*

	Situation Métier	Modalité PICB	A	B	C	B-A	C-A
		N° Situation	Score (%)			ΔScore (%)	
Situations	I	1	23	23	30	0	7
		2	59	57	67	-2	8
		3	77	74	81	-3	4
	II	4	10	16	27	6	16
		5	17	49	46	31	28
		6	47	75	67	28	20
	III	7	10	11	7	0	-3
		8	34	39	32	5	-2
		9	57	66	59	9	2
	IV	10	14	32	42	19	28
		11	51	69	75	19	24
		12	75	84	87	9	12

Ces conclusions rejoignent celles des travaux menés par d'autres auteurs pour les configurations correspondant à des niveaux de parole élevés [3], [4][6]. D'après ces études, on pouvait cependant s'attendre à un effet bénéfique moins marqué pour les plus faibles niveaux de parole : on constate que ce n'est pas le cas pour les configurations 10, 11 et 12, qui correspondent aux niveaux de parole les plus faibles (respectivement 58, 63 et 68 dBA), et pour lesquels une amélioration de l'intelligibilité a été systématiquement mise en évidence avec les deux modèles de PICB.

Le seuil en dessous duquel le port de PICB dégrade l'intelligibilité se situe donc probablement en dessous des niveaux de parole évalués. Pour les modèles testés, qui ont des atténuations relativement faibles, ce seuil correspond probablement à une voix chuchotée.

## 4 Conclusion

Ces travaux ont permis d'évaluer l'influence du port de deux modèles de protecteurs individuelles contre le bruit (PICB) sur l'intelligibilité de la parole en milieu ferroviaire pour 12 situations métiers correspondant à différents canaux de transmission, différents types de bruits de fond et différents niveaux de parole.

Dans toutes les situations étudiées, le port de PICB ne dégrade pas l'intelligibilité. Il permet au contraire d'améliorer l'intelligibilité de manière significative dans près de la moitié des configurations, y compris celles correspondant aux niveaux de parole les plus faibles pour lesquelles on aurait pu craindre un effet inverse.

Cependant, il est important de rappeler que les résultats de cette étude ont été obtenus dans des conditions de test particulières et maîtrisées. Certains facteurs comme l'influence des positions des sources de bruits et de parole ainsi que la distorsion de la chaîne de communication radio (pour les métiers conducteurs) n'ont pas été étudiés.

Bien que les conclusions de cette étude encouragent le port de PICB pour les normo-entendants, elle doit être complétée par des tests « terrains » en conditions réelles de

travail. Pour pouvoir déployer le port du PICB, en risque ferroviaire, au sein de la SNCF, des expérimentations en situations réelles de travail ont déjà débuté dans différents établissements de l'entreprise et, compte tenu du risque ferroviaire, un accompagnement spécifique est mise en place pour éviter tout risque d'accident lié à la non-perception d'un message de sécurité.

D'après Lindemann [13], l'effet du port de PICB en cas de déficience auditive tendrait à dégrader l'intelligibilité. Cette étude doit être étendue maintenant à des sujets présentant de légères pertes auditives, insuffisantes pour justifier une inaptitude au travail en risque ferroviaire, mais qui pourraient risquer d'entraîner une dégradation de l'intelligibilité de la parole sous PICB.

## Références

- [1] French, N. R., & Steinberg, J. C. Factors governing the intelligibility of speech sounds, *The Journal of the Acoustical Society of America*, 19(1), 90-119, (1947)
- [2] Kryter, K. D, Effects of ear protective devices on the intelligibility of speech in noise, *The Journal of the Acoustical Society of America*, 18(2), 413-417 (1946).
- [3] Casali, J. G., & Horylev, M. J. (1987, September). Speech discrimination in noise: The influence of hearing protection. In Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting (Vol. 31, No. 11, pp. 1246-1250). SAGE Publications.
- [4] Pekkarinen, E., Viljanen, V., Salmivalli, A., & Suonpaa, J. (1990). Speech recognition in a noisy and reverberant environment with and without earmuffs. *Audiology*, 29, 286-293.
- [5] Hashimoto, M., Kumashiro, M., & Miyake, S. Speech perception in noise when wearing hearing protectors with little low-frequency attenuation, *International Journal of Industrial Ergonomics*, 18(2), 121-126, (1996)
- [6] Fernandes, J. C. Effects of hearing protector devices on speech intelligibility, *Applied Acoustics*, 64(6), 581-590, (2003).
- [7] Berger E.H. 2000. Hearing protection devices. Chapter 10. In: E.H. Berger, L.H. Royster, J.D. Royster, D.P. Driscoll, & M. Layne (eds.), *The Noise Manual*, Fifth Edition, American Industrial Hygiene Association, Fairfax VA, pp. 379-454.
- [8] ISO, TR 4870. Acoustics – the construction and calibration of speech intelligibility tests. *International Standardization Organization*, 1991
- [9] Fournier, J. E. (1951). Audiométrie vocale: les épreuves d'intelligibilité et leurs applications au diagnostic, à l'expertise et à la correction prothétique des surdités. *Maloine*.
- [10] Goldberg, D. E., & Holland, J. H. (1988). Genetic algorithms and machine learning. *Machine learning*, 3(2), 95-99.
- [11] Recommandation n° 02/1bis du Bureau International d'Audio Phonologie

- [12] ISO 9921. Ergonomics-Assessment of speech communication. *International Standardization Organization*, 2003.
- [13] Lindeman, H. E. (1976). Speech intelligibility and the use of hearing protectors. *Audiology*, 15(4), 348-356.