

Effet du port de protecteur individuel contre le bruit sur la communication dans le bruit

Jean-Sébastien Niel
Gwenolé Nexer

Décembre 2013

Cette étude permettra d'étudier l'impact du protecteur et en particulier la pente de celui-ci sur l'intelligibilité dans le bruit.

A l'aide d'un test subjectif sur 22 individus, nous avons observé une augmentation d'environ 20% de mots reconnus avec les protections à réponse uniforme en comparaison avec les protections à réponse non uniforme dans les mêmes niveaux d'atténuation.

Se protéger contre le bruit
E-130-1



Table des matières

1	INTRODUCTION	4
1.1	Avant-propos	4
1.1.1	La nécessité d’entendre les signaux d’avertissement, de communiquer dans le bruit	4
1.1.2	Objectifs de l’étude	4
1.1.3	Evaluer l’uniformité des protections auditives	5
1.1.4	Evaluer l’intelligibilité dans le bruit	6
2	COMMUNIQUER DANS LE BRUIT	7
2.1	Les éléments qui entrent en jeu	7
2.2	Nature du bruit	7
2.3	Le locuteur / propriétés du signal utile	8
2.3.1	Effort vocal en fonction du bruit	8
2.3.2	L’effet du port de protecteurs	11
2.4	Auditeur / Réception du signal	12
2.4.1	Port de protections et pertes auditives	12
2.4.2	Effet de masquage :	13
2.4.3	Capacité de reconstruction du message	15
2.5	Configuration de la scène	15
2.5.1	Influence de la distance entre les interlocuteurs sur l’intensité du signal reçu :	15
2.5.2	Directivité de la tête :	16
3	METHODES DE MESURE D’INTELLIGIBILITE	16
3.1	Méthodes objectives	16
3.1.1	Méthode SIL	16
3.1.2	Méthode STI	18
3.1.3	Méthode STI avec prise en compte du masquage et des seuils d’audition	20
3.2	Les tests subjectifs	22
3.2.1	Tests phonétiques	22
3.2.2	Tests d’intelligibilité	22
3.3	Relation entre les méthodes	22
3.4	Protocole de test	23
3.4.1	Echantillons testés	24
3.4.2	Population	25
3.4.3	Dispositif expérimental	25
3.4.4	Matériel vocal	26
3.4.5	Environnements bruyants	26
3.5	Modélisation simple des résultats	29
3.5.1	Première approximation	29

3.5.2	Seconde approximation	29
3.5.3	Troisième approximation	29
3.5.4	Le modèle	30
4	COMPARAISON DES RESULTATS AVEC LE STI	31
4.1	Simulation des conditions de test	32
4.2	Résultats	32
5	RECHERCHE D'UNE METHODE DE PREDICTION DE L'INTELLIGIBILITE	34
6	CONCLUSION	35
7	BIBLIOGRAPHIE	36
	ANNEXE 1 : VALEURS D'AFFAIBLISSEMENT DES PICB CITES DANS L'ETUDE	38

1 Introduction

1.1 Avant-propos

1.1.1 La nécessité d'entendre les signaux d'avertissement, de communiquer dans le bruit

Dans le milieu industriel, de nombreux signaux d'alarme sont présents. Ils se distinguent selon leur rôle :

- un avertisseur de danger dont le rôle est de prévenir les travailleurs d'un danger imminent (exemple : alarme incendie, signal de recul d'un véhicule...),
- un signal indicatif impliquant une action, ils permettent de prévenir le travailleur d'une action à réaliser (sonnerie de téléphone, fin de cycle d'une machine...).

Les trois termes suivants indiquent des niveaux graduels d'interprétation des signaux :

1. Percevoir : entendre un signal sans être capable de le reconnaître.
2. Reconnaître : identifier le signal, pour une voix par exemple, nous reconnaissons une voix de femme mais sans comprendre le sens des mots.
3. Comprendre : identifier le message et comprendre sa signification.

Lorsque le niveau de bruit est trop élevé, il y a saturation de l'oreille. Notre système auditif, notamment la cochlée est saturée et incapable de traiter correctement les informations reçues. Notre capacité à reconnaître et à comprendre les signaux est diminuée.

Le port d'un protecteur individuel contre le bruit (PICB) adapté favorise en règle générale une meilleure compréhension en diminuant le niveau sonore, évitant ainsi une saturation de la cochlée (Casali J. G., 2000 [1]).

La norme européenne EN458 de 2005 indique ceci : « *Lorsque la reconnaissance de sons tels que messages verbaux et signaux d'avertissement est indispensable, il est préférable d'utiliser des protecteurs individuels à spectre d'affaiblissement plat.* » Cela peut paraître logique mais il semblait important de le prouver et d'estimer dans quelles proportions.

1.1.2 Objectifs de l'étude

L'objectif de cette étude est d'évaluer l'impact des protections auditives sur l'intelligibilité lors d'une communication dans le bruit. Pour cela, ce document présente les principaux mécanismes qui interviennent dans la transmission de parole d'un locuteur vers un auditeur dans le bruit. Nous cherchons également à quantifier l'impact de la pente d'affaiblissement du protecteur sur cette intelligibilité, notamment à l'aide d'un test subjectif.

Nous allons donc confronter les résultats observés au cours d'un test subjectif avec un indice d'intelligibilité objectif, le STIr. Dans le cas où le STIr ne traduit pas la réalité observée, nous chercherons à modéliser les résultats observés pour calculer un indicateur de substitution.

1.1.3 Evaluer l'uniformité des protections auditives

Les données d'atténuation des protecteurs sont établies après mesures par un laboratoire de certification sur un panel de sujets entraînés. C'est l'affaiblissement moyen obtenu sur les sujets (auquel on soustrait l'écart-type) qui spécifie l'atténuation du protecteur. L'affaiblissement est mesuré pour chaque fréquence centrale des bandes d'octave de 63Hz à 8000Hz en décibels.

La norme ISO 4869-2 (Estimation des niveaux de pression acoustique pondérés A en cas d'utilisation de protecteurs individuels contre le bruit) définit les calculs du SNR et HML pour la Communauté Européenne.

Le SNR est l'indice global d'affaiblissement (Single Number Rating), il s'agit d'une moyenne pondérée de l'affaiblissement sur toutes les fréquences mesurées. Le SNR traduit la puissance du filtre acoustique.

Les valeurs HML sont des moyennes pondérées des fréquences hautes (High), moyennes (Medium) et basses (Low). Les HML traduisent l'uniformité du filtre.

Ci-dessous un exemple de deux filtres :

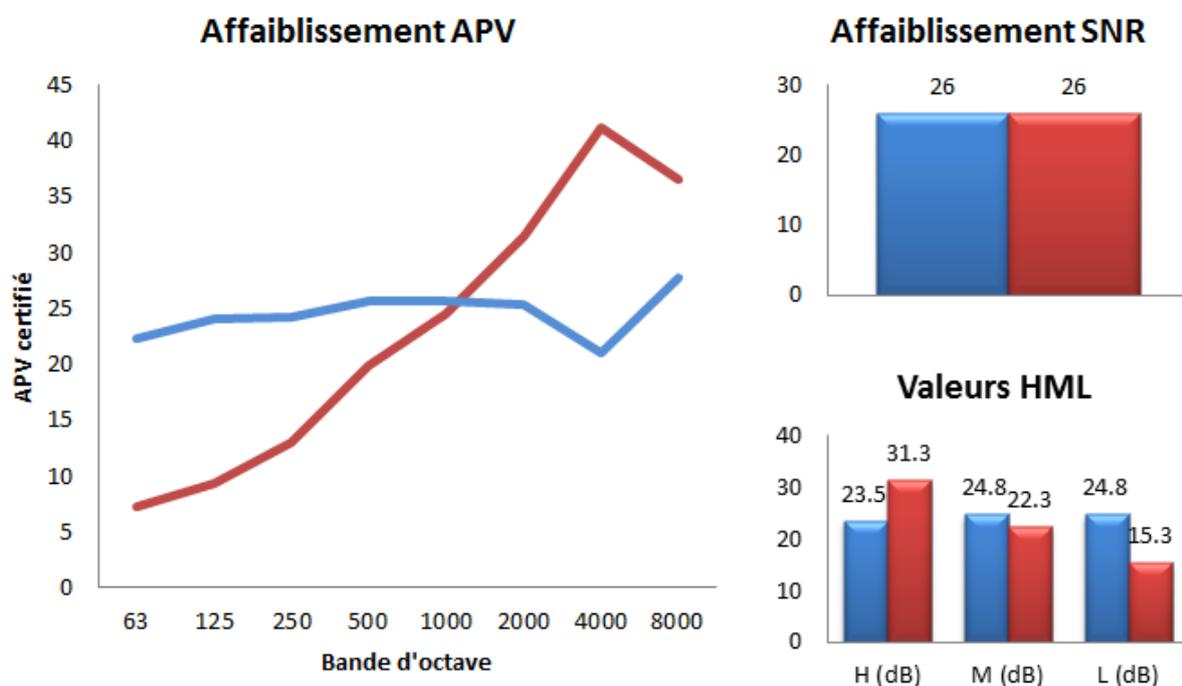


Figure 1 : trois vues différentes de l'affaiblissement de deux protecteurs. On constate que la présentation par fréquence et par moyenne HML permet immédiatement de constater un écart entre les deux, alors que la moyenne SNR est, elle, identique.

On observe que l'affaiblissement traduit par le SNR est identique. En revanche, il y a une distorsion importante du spectre audio avec le filtre représenté en rouge, la pente de la courbe rouge est plus importante.

Dans cette étude, nous avons choisi de synthétiser l'uniformité d'une protection auditive par un indicateur unique : sa pente avec $Pente = H - L$.

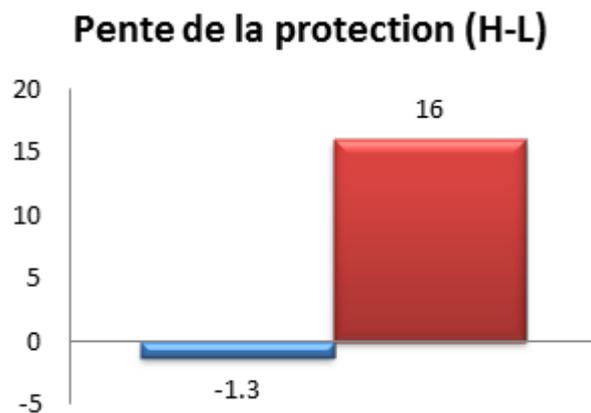


Figure 2 : Pentes (H-L) des protecteurs qui ont le même SNR

1.1.4 Evaluer l'intelligibilité dans le bruit

L'intelligibilité de la parole traduit le taux de transmission de la parole d'une source (locuteur, haut-parleur...) vers un auditeur.

Historiquement, les premières mesures d'intelligibilité de la parole sont des mesures **subjectives** faisant appel à des locuteurs et des auditeurs. (Test de Campbell 1910, Fletcher & Steinberg 1929, Fairbanks, test de rime modifié, test de rime à visée diagnostique). Ces méthodes sont délicates à mettre en œuvre et posent des problèmes d'objectivité et de reproductibilité. En général, on mesure l'intelligibilité en % de messages (mots, phrases...) correctement retranscrits par l'auditeur.

Les mesures objectives et prédictives de l'intelligibilité de la parole permettent d'évaluer l'intelligibilité sans faire appel à des sujets de tests. Il existe plusieurs indices, notamment l'indice d'articulation (**AI**), l'indice de transmission de la parole (**S.T.I.**) ou encore le niveau d'interférence avec la parole (**S.I.L.**). L'AI permet de prédire le score obtenu par des mesures subjectives habituellement observées à partir des niveaux de parole et de bruit. Le SIL est mesuré à partir du niveau de bruit ambiant, de l'effort vocal du locuteur, de l'utilisation ou non d'un protecteur contre le bruit et de la langue maternelle. Le STI peut permettre de prendre en compte les éléments perturbateurs tels que le bruit et la réverbération d'un canal de transmission, ainsi que des éléments liés aux interlocuteurs tels que le sexe, l'effort vocal ou encore la distance entre les interlocuteurs. Le SIL et le STI sont décrits dans la norme NF EN ISO 9921 2004.

2 Communiquer dans le bruit

2.1 Les éléments qui entrent en jeu

La reconnaissance de parole est liée à une multitude de paramètres dont voici les principaux :

- Le bruit ambiant

- Intensité sonore
- Spectre
- Variation dans le temps stationnaire/non stationnaire

- Le signal utile émis par le locuteur

- Clarté du message
- Gamme spectrale (sexe, effort vocal)
- Perception de sa propre voix et régulation du contenu spectral/ niveau sonore
- Port de protecteurs sur mesure (amplifie la perception de sa propre voix)

- L'auditeur

- Seuils d'audition
- Effet de masquage propre à l'individu
- Capacité à reconstruire le message
- Maîtrise de la langue / culture
- Suppléance mentale (contexte)
- Capacité de lecture labiale
- Port de protections auditives

- La configuration de l'environnement

- Distance entre les interlocuteurs
- Angle de réception du message, du fait de la directivité de la tête
- Localisation du bruit
- Acoustique de l'environnement (Réverbération...).

2.2 Nature du bruit

Le bruit peut être stationnaire ou non :

Le bruit est non stationnaire : Le spectre varie au cours du temps. Les sources de bruit peuvent être ponctuelles. Au cours d'une phrase par exemple, une partie du message sera plus altérée par le bruit ambiant qu'une autre.

Le bruit est stationnaire : il s'agit d'un bruit ambiant dont le spectre ne varie pas au cours du temps, le travailleur est exposé à ce bruit pendant toute la durée de transmission du message.

Voici un spectrogramme de bruits industriels :

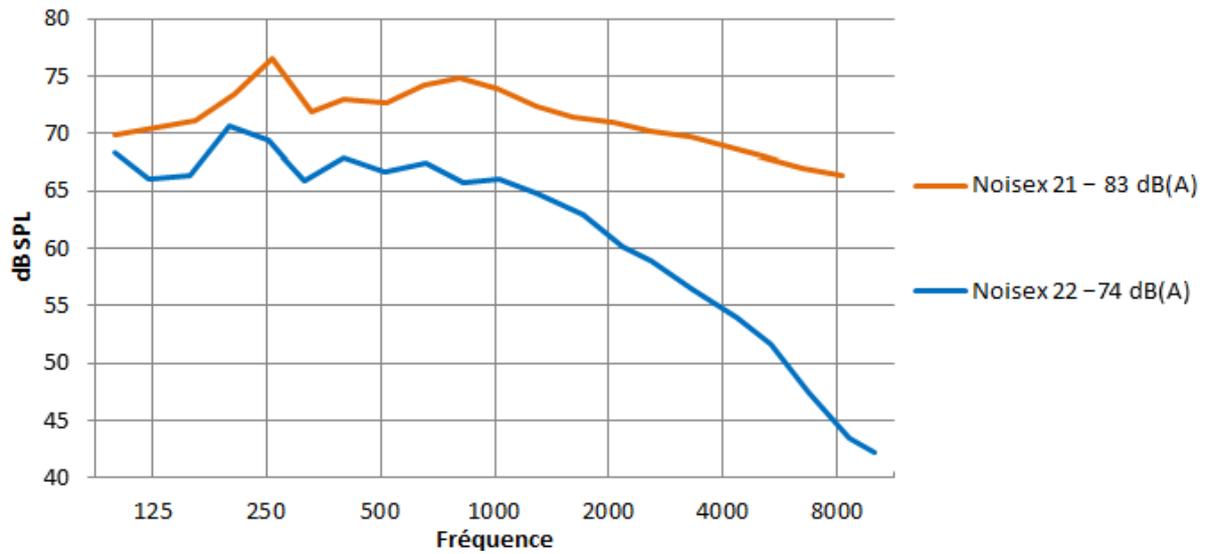


Figure 3 : spectres de deux bruits industriels stationnaires enregistrés dans une usine de voitures, issus de la base de données Noisex 1990, données issues de la thèse (Le Cocq C., 2011 [20])

2.3 Le locuteur / propriétés du signal utile

2.3.1 Effort vocal en fonction du bruit

2.3.1.1 Effet Lombard

L'effet Lombard, nommé d'après Étienne Lombard, est un phénomène de modification de la prononciation humaine (fréquence fondamentale, volume sonore, articulation, allongement des voyelles). Dans le bruit, le locuteur adapte naturellement sa voix pour mieux se faire comprendre.

Le graphe ci-dessous donne la relation définie dans la norme ISO 9921 entre la gamme de **l'effort vocal** (niveau sonore continu équivalent de la parole à 1 mètre) et le **niveau de bruit ambiant** dans la position du locuteur.

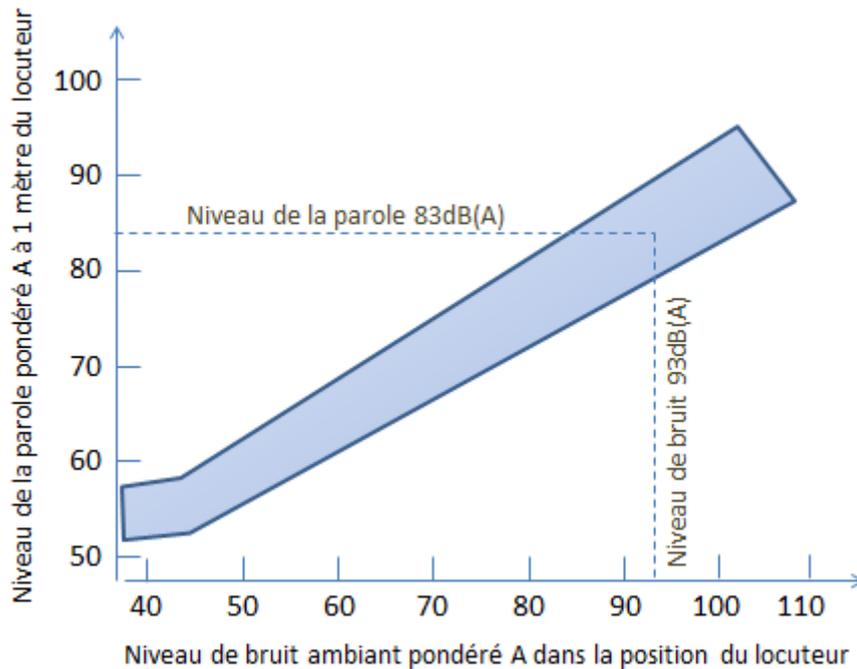


Figure 4 : relation entre le niveau sonore continu équivalent de la parole à 1 mètre et le niveau de bruit ambiant, extrait de la norme ISO 9921)

Plus le locuteur doit hausser la voix (notamment une personne qui ne porte pas de protecteurs en milieu bruyant), plus le contenu spectral du message est déformé et par conséquent l'intelligibilité du message en est altérée. (Hétu, R., 1994 [2] , Pickett, J., 1956 [3]).

2.3.1.2 Déformation de la voix

Plusieurs niveaux de parole ont été définis par Kryter (1985 [5]) et Webster (1979 [4]) nous constatons **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** que le niveau d'une voix forte, se situe à environ 74dB, les niveaux de voix criée ou maximum ne pouvant être soutenus très longtemps par un individu sans l'adjonction d'un système d'amplification.

Notons également que ces niveaux sont relevés à des distances très courtes, un mètre voire moins, plus la distance entre les individus augmente, plus le niveau sonore diminue.

Force de la voix	Niveau global - dB(A)
Maximum	88
Cri	82
Très forte	74
Elevée	65
Normale	57
Détendue	50
Murmure	40

Tableau 1 : force de la voix associée aux différents niveaux de parole en dB (A) mesurés à 1 m devant le locuteur (Webster, 1979 [4])

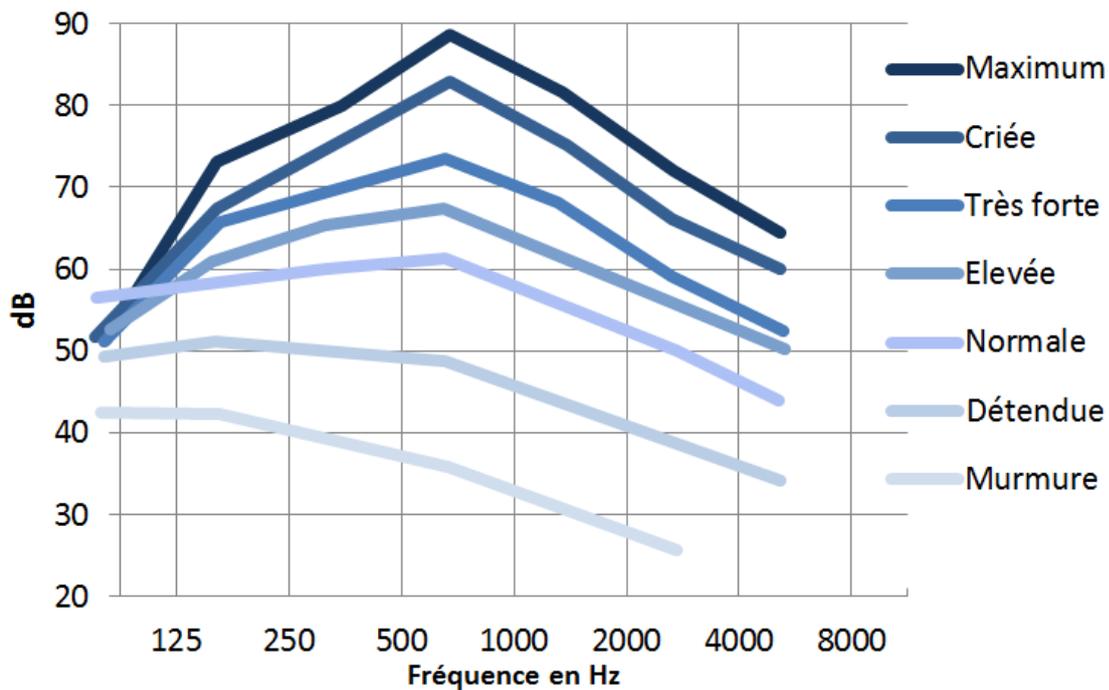


Tableau 2 : spectres moyens de la parole à long terme pour différentes forces de la voix d'un homme mesurés à 1 m devant le sujet (Webster, 1979 [4])

La bande de fréquence de la voix d'homme est plus large que la bande de fréquence de la voix de femme. On note aussi une différence d'effort vocal dans le bruit en fonction du sexe.

Niveau de la voix	Hommes	Femmes
Normal	58	55
Soutenu	65	63
Fort	76	71
Criée	89	82

Tableau 3 : niveau de la parole de conférenciers, hommes et femmes dans le calme mesuré à moins d'un mètre (Kryter 1985 [5])

2.3.1.3 Effet sur l'intelligibilité

L'impact de l'effort vocal sur l'intelligibilité a été évalué par Pickett (1956 [3]). Les courbes ci-dessous montrent la relation entre l'intelligibilité de la parole, la force de la voix et le rapport signal sur bruit.

On remarque que la voix chuchotée ou criée, donc déformée, entraîne une chute d'intelligibilité importante dans les trois différentes configurations signal/bruit testées. Naturellement, le rapport signal sur bruit a un impact direct sur l'intelligibilité.

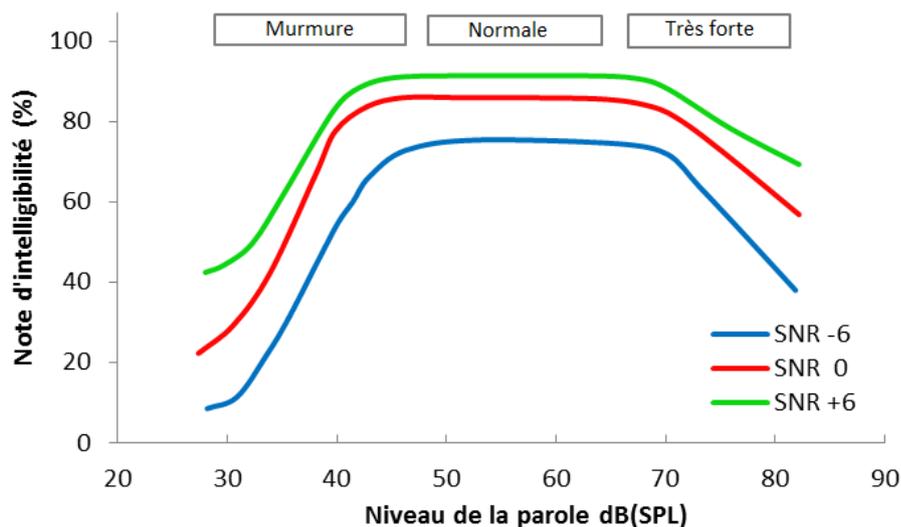


Figure 5 : relation entre l'intelligibilité de la parole, la force de la voix et le rapport signal sur bruit. Tiré de Pickett (1956 [3])

2.3.2 L'effet du port de protecteurs

2.3.2.1 Modification de la voix

Avec le port d'un protecteur auditif, le locuteur entend l'environnement de manière plus faible. En revanche, il perçoit sa propre voix de manière plus élevée. Cet effet est dû au phénomène d'occlusion qui augmente la perception des bruits physiologiques et modifie la perception de la voix.

C'est pourquoi il est possible que le locuteur compense naturellement son effort vocal en fonction de la perception de sa propre voix, modifiée par le port de protections auditives. Suter (1992 [6]) a passé en revue un certain nombre d'études à ce sujet.

Howell et Martin (1975 [7]) ont notamment constaté que lorsqu'un locuteur porte des bouchons d'oreilles, la diminution de l'effort vocal est d'environ 4 dB. En revanche, cette observation n'est valable que pour des niveaux de bruits élevés (93 dB), et non dans le calme (54 dB). Hörmann, Lazarus-Mainka, Schubeius, et Lazarus (1984 [8]) ont par la suite confirmé ces résultats. La Norme ISO 9921 prévoit de ce fait que l'effort vocal du locuteur diminue de 3dB avec des protecteurs auditifs.

L'effort vocal étant diminué, l'intelligibilité des paroles pour un auditeur en est diminuée (Kryter 1946 [9], Robinson and Casali, 2000 [10], Gelfand, 2004 [11]).

Howell et Martin (1975 [7]) ont remarqué que cette perte d'intelligibilité n'est pas uniquement due à la réduction de l'effort vocal. Ils ont suggéré que les individus portant des protections peuvent aussi parler moins nettement. En revanche, Martin et al. (1976 [12]) ont évalué les différences spectrales de la qualité de voix des locuteurs avec et sans bouchon d'oreille. Leur analyse spectrale est reproduite dans la **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** qui montre des différences significatives entre les niveaux d'expression dans les conditions d'oreilles bouchées et non bouchées (soit environ 2 à 3 dB (A)), en revanche ils n'ont remarqué aucune différence significative sur le plan fréquentiel.

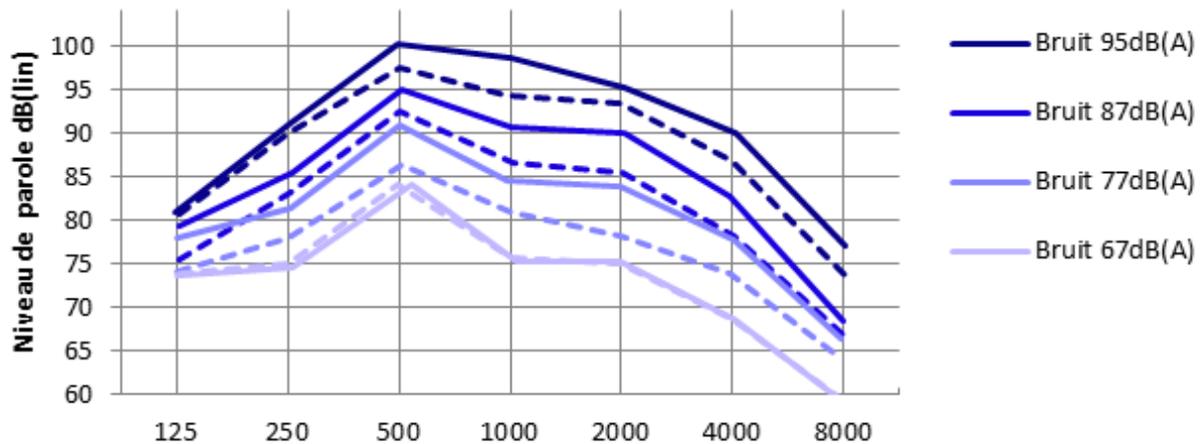


Figure 6 : niveaux moyens par bande d'octave pour des niveaux de bruits ambiants de 67 à 95 dB(A). Les locuteurs ont les oreilles non occluses (trait plein) ou bien ont des bouchons d'oreilles (pointillé). (Martin, Howell, & Lower, 1976 [12]).

2.3.2.2 Vitesse de parole du locuteur :

Hörmann, Lazarus-Mainka, Schubeius, et Lazarus (1984 [8]) ont également remarqué que pour des niveaux de bruit élevé (92 dB(A)), les locuteurs portant des bouchons d'oreilles articulent de manière plus rapide, les pauses entre les mots et les phrases sont réduites d'environ 25%. La vitesse d'échange de l'information, qui est une mesure du temps de réaction de l'auditeur, diminue avec l'augmentation du niveau de bruit et lorsque les locuteurs et les auditeurs portent des protecteurs.

2.4 Auditeur / Réception du signal

2.4.1 Port de protections et pertes auditives

Le port de protecteurs, en particulier des protections à réponse non uniforme, peut aggraver les problèmes d'intelligibilité des personnes atteintes de troubles de l'audition.

Le protecteur auditif peut réduire le signal sonore au point d'être sous les seuils d'audition de l'auditeur. Le graphique suivant, dont les données sont issues de Lazarus (1983 [13]), montre l'effet du port d'un hypothétique casque antibruit, atténuant le signal et le bruit pour un sujet normo-entendant et pour un sujet atteint de troubles de l'audition.

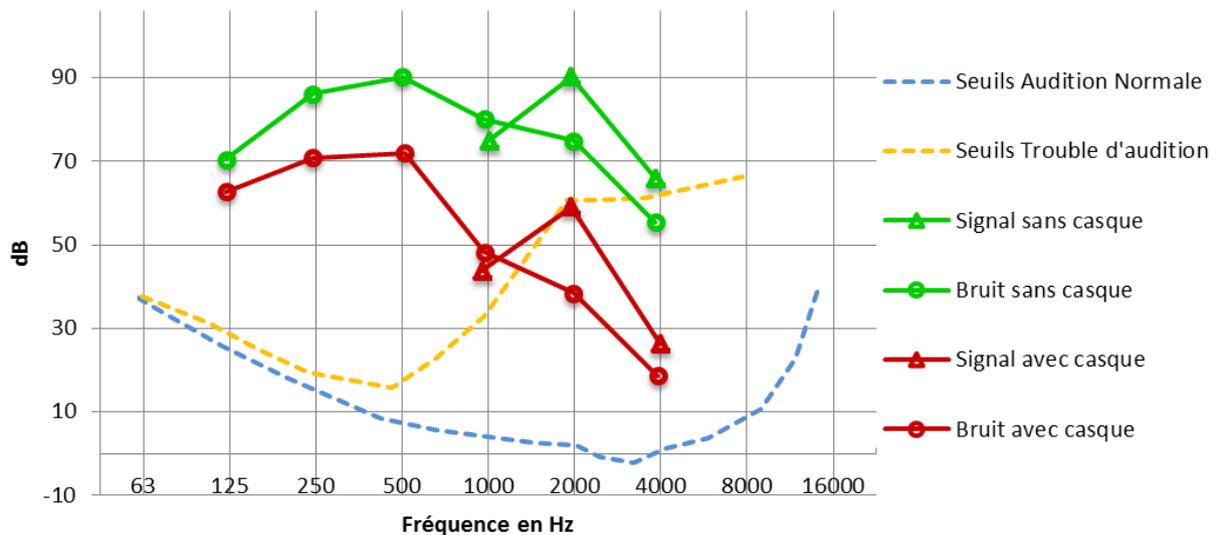


Figure 7 : effet d'un casque antibruit sur le signal et le bruit pour un sujet normo-entendant (courbe bleue) et pour un sujet atteint d'une perte auditive neurosensorielle (courbe orange). Les courbes vertes représentent le signal et le bruit à l'oreille du sujet sans le casque. Données issues de Lazarus (1983 [13])

On comprend ici que le phénomène est nettement aggravé si le protecteur auditif atténue beaucoup les hautes fréquences, ce qui est souvent le cas.

2.4.2 Effet de masquage :

Lorsque le seuil d'audibilité d'un son (masqué) augmente à cause de la présence d'un autre son (masquant), on parle de masquage. Le masquage intervient quand deux signaux sonores atteignent la cochlée de l'auditeur simultanément. Un signal masquant de forte intensité sur une fréquence donnée provoque un masquage plus au moins important des sons de plus faible intensité sur les fréquences voisines, en fonction de l'amplitude et la fréquence de ce signal masquant.

Les phénomènes de masquage sont complexes et la théorie globale du masquage introduite par Fletcher dès 1937 n'existe toujours pas.

Il y a beaucoup de mécanismes en jeu au niveau du masquage, l'un d'eux est le phénomène de « line busy » ou « de la ligne occupée ». Face à un bruit élevé, les neurones utiles au codage du signal vont être sollicités. La période réfractaire de décharge neuronale ne permet pas de transmettre à la fois l'information du bruit et du signal. Le signal masquant occupe la ligne des neurones.

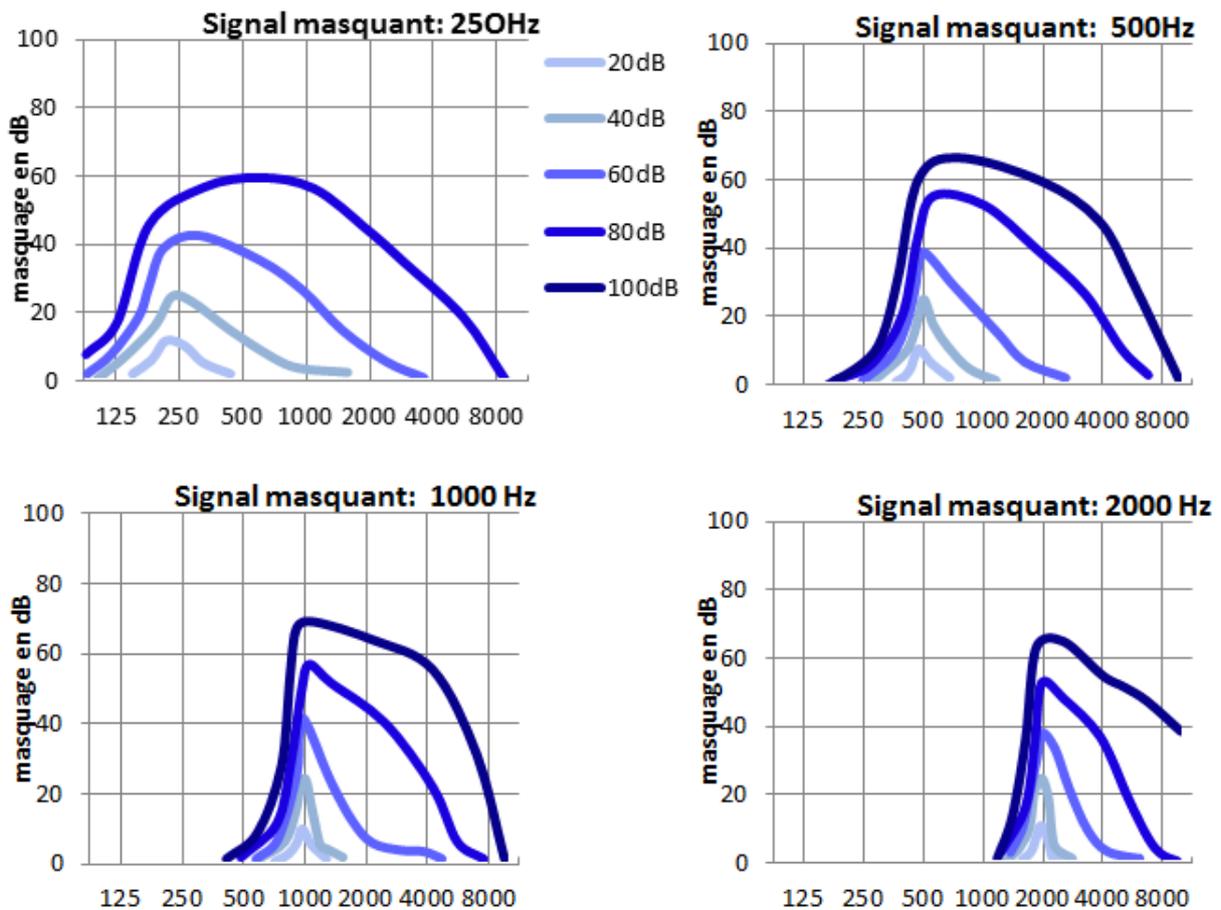


Figure 8 : allure du masquage produite par différents sons purs et pour différents niveaux du signal masquant. Adapté de Ehmer (1958 [21])

On observe que l'effet s'étend à partir de la fréquence du son masquant. Cette dissymétrie traduit le comportement de notre oreille interne où les sons graves ont tendance à masquer les sons aigus.

Les bruits industriels possèdent en général une forte énergie en basses fréquences. L'effet de masquage provoqué par ces bruits couvrira donc presque la totalité du spectre audible et altérera les capacités à percevoir, reconnaître et comprendre les signaux de parole.

Le port de protecteurs auditifs diminue à la fois le signal masquant et le signal utile, or la réduction du niveau de bruit masquant entraîne une diminution de cet effet de masquage.

Néanmoins, nous avons vu que les protecteurs auditifs ont en général une atténuation non uniforme, l'affaiblissement est bien souvent plus élevé pour les hautes fréquences. La réduction de l'effet de masquage apporté par le port de protecteurs auditifs est alors moins bénéfique, d'autant plus si l'auditeur est atteint d'une perte auditive. (Tran Quoc et Hétu, 1996 [14]).

2.4.3 Capacité de reconstruction du message

L'intelligibilité est bien évidemment liée à la clarté du signal reçu qui dépend du locuteur, de l'environnement et de l'auditeur, mais n'oublions pas la capacité de l'auditeur à interpréter les messages.

L'interprétation des messages est directement liée à la maîtrise de la langue en elle-même et de la connaissance du vocabulaire contenue dans les messages. On distingue généralement une intelligibilité réduite pour le même message si les locuteurs et auditeurs sont non natifs et parlant couramment une deuxième langue (ISO 9921).

Dans le cas où le signal est dégradé de manière importante, la suppléance mentale peut intervenir. Il s'agit d'une stratégie d'interprétation, notamment utilisée par les personnes malentendantes pour comprendre l'essentiel d'une conversation sans même distinguer plus d'un quart des mots.

Dans le cas où les interlocuteurs sont face à face, la lecture labiale (maxillofaciale) peut aussi intervenir. La capacité de reconnaître des mots sur les lèvres dépend de l'expérience du sujet et du contexte de discussion.

La question des indices visuels en communication en face à face a été étudiée par Rink (1979 [15]). Rink a observé que dans un environnement bruyant, les auditeurs malentendants ou normo-entendants obtiennent de meilleurs résultats avec des indices visuels, et ce, quel que soit le protecteur testé. Précédemment, Martin, Howell et Lower (1976 [12]) avaient constaté que la présence d'indices visuels réduit les différences entre les résultats obtenus avec oreilles occluses et non occluses. Pour des niveaux de bruit élevés, les scores de reconnaissance sont augmentés d'environ 30%.

2.5 Configuration de la scène

2.5.1 Influence de la distance entre les interlocuteurs sur l'intensité du signal reçu :

Le niveau sonore à l'oreille de l'auditeur peut être estimé à partir de la force de la voix du locuteur et de la distance entre les interlocuteurs.

Distance entre interlocuteurs	Niveau maximal reçu par l'oreille quand, pour s'entendre, il faut parler à :			
	Voix criée	voix très forte	voix forte	voix normale
15 cm	90 dB(A)	84 dB(A)	78 dB(A)	72 dB(A)
30 cm	84 dB(A)	78 dB(A)	72 dB(A)	66 dB(A)
60 cm	78 dB(A)	72 dB(A)	66 dB(A)	60 dB(A)
120 cm	72 dB(A)	66 dB(A)	60 dB(A)	54 dB(A)

Tableau 6: ce tableau, (sans valeur réglementaire), permet une estimation approximative du niveau du signal vocal à l'oreille de l'auditeur. (Phan Chan The, (2003) [22])

Ces estimations peuvent être obtenues à l'aide de la formule suivante :

$$L = L_{1m} - 20\text{Log}(d)$$

L : niveau du signal sonore à l'oreille de l'auditeur en dB

L_{1m} : niveau du signal sonore à 1 mètre de l'auditeur en dB

d : distance entre les interlocuteurs.

Cette relation est valable jusqu'à 2 mètres, voire 8 mètres dans certaines conditions définies dans la norme ISO 9921. En connaissant le niveau sonore d'une voix élevée mesurée à 1 mètre (Webster, 1979 [4]), on peut estimer le niveau sonore perçu à d'autres distances.

2.5.2 Directivité de la tête :

L'angle entre la source du signal et la tête de l'auditeur a une influence non négligeable sur sa perception sonore. Certaines fréquences sont plus ou moins atténuées en fonction de l'angle de la source sonore telle que la voix.

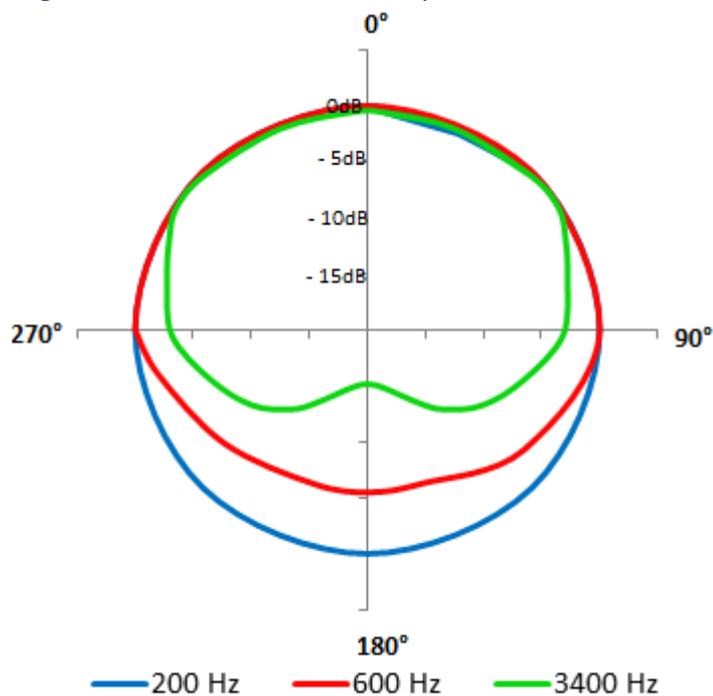


Figure 9 : schéma de directivité de la tête humaine, données issues de Delétré (2001 [16])

En général, les basses fréquences sont moins affectées par cette directivité que les hautes fréquences.

3 Méthodes de mesure d'intelligibilité

3.1 Méthodes objectives

3.1.1 Méthode SIL

Le niveau d'interférence avec la parole (Speech Interference Level) propose une méthode simple de prédiction ou d'évaluation de l'intelligibilité de la parole dans le cas d'une **communication directe** dans une **ambiance bruyante**.

Paramètres pris en compte :

- moyenne arithmétique du **spectre de bruit**
- effort vocal du locuteur
- distance entre le locuteur et l'auditeur.

Le SIL est un calcul de signal sur bruit :

$$SIL = L_{SAL} - L_{SIL}$$

Soit SIL = niveau de parole – niveau d'interférence du bruit.

3.1.1.1 Calcul du niveau d'interférence du bruit L_{SIL}

Dans la méthode SIL, le niveau d'interférence du bruit avec la parole (L_{SIL}) est la moyenne arithmétique des niveaux du bruit ambiant des quatre bandes d'octave suivantes : 500 Hz, 1 000 Hz, 2 000 Hz et 4 000 Hz.

$$L_{SIL} = \frac{1}{4} \sum L_{N,oct}$$

3.1.1.2 Estimation de l'effort vocal L_{SAL}

3.1.1.2.1 Prise en compte de l'effet Lombard

Nous avons vu précédemment que l'effort vocal dépend du bruit ambiant (norme ISO 9921). Nous constatons Figure 10 que l'effort vocal (niveau sonore continu équivalent de la parole) à 1 mètre varie en fonction de l'exposition au bruit ambiant.

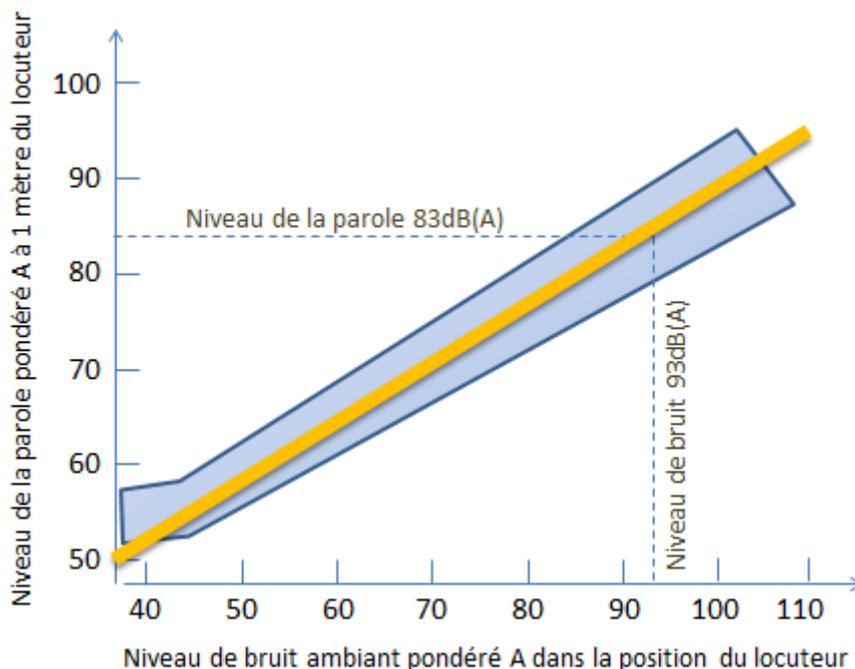


Figure 10 : relation entre le niveau sonore continu équivalent de la parole à 1 mètre et le niveau de bruit ambiant, en jaune, une approximation de cette relation.

Nous choisirons d'estimer la relation montrée dans la Figure 10 par

$$L_{SA1m} = 0,57 \times L_{NAS} + 30 \text{ (Courbe jaune ci-dessus)}$$

où : L_{SA1m} est le niveau de la parole pondéré à 1 mètre du locuteur

Et : L_{NAS} est le niveau de bruit ambiant pondéré A dans la position du locuteur

3.1.1.2.1.1 Prise en compte du protecteur

Si le bruit ambiant est > 75 dB, l'effort vocal du locuteur diminue de 3dB.

3.1.1.2.1.2 Diminution de la qualité de parole

Si l'effort est > 75dB, la qualité de parole est diminuée.

Cette dégradation peut être prise en compte en réduisant l'effort vocal de : $0,4^{*(LSAM1-75)}$

3.1.1.2.1.3 Prise en compte de la distance entre les interlocuteurs

$$L_{SAL} = L_{SA1m} - 20 \log\left(\frac{r}{r_0}\right)$$

où :

r est la distance, en mètres, entre le locuteur et l'auditeur ;

$$r_0 = 1m$$

3.1.1.2.1.4 Prise en compte de la langue maternelle

On retire 4dB dans le cas où le locuteur et/ou l'auditeur ne communiquent pas dans leur langue native.

Exemple d'utilisation de la méthode SIL:

- dans un bruit ambiant à 80dB, le locuteur a un effort vocal à 72.6dB (effet Lombard)

- il s'agit d'un bruit blanc

$$SIL = 80 - 72,6 = -7,4$$

Ce qui correspond à une intelligibilité « Mauvaise » selon la norme ISO 9921.

Cet indicateur est simple à calculer mais reste très approximatif. Le principal défaut de cette méthode **est l'absence de prise en compte des composantes spectrales du signal et du bruit**, or c'est l'information dont nous avons besoin pour évaluer **l'impact de l'uniformité des protecteurs sur l'intelligibilité**. Le SIL est un outil pratique mais non adapté à notre application en l'état.

3.1.2 Méthode STI

La méthode est décrite dans les normes ISO 9921 et CEI 606268 et détaillée dans Basics of the STI measuring method, document de référence de Steeneken et Houtgast [17] :

contrairement au SIL, cette méthode **est plus précise et prend en compte les composantes spectrales du signal et du bruit**. Cette méthode est notamment utilisée pour évaluer la qualité d'un **canal de transmission** (pièce, système de transmission ...) d'un point de vue de l'intelligibilité. En plus des paramètres utilisés par la méthode SIL, cette méthode prend en **compte les propriétés acoustiques de l'environnement** (réverbérations, échos...).

La méthode STI a été initialement développée pour effectuer des **mesurages**. À cet effet, un signal d'essai spécifique a été élaboré, qui, après sa transmission par le canal soumis à essai, a fait l'objet d'une analyse assez complexe, afin de déterminer les **rapports signal-bruit effectifs** dans différentes bandes de fréquences et de calculer l'indice STI.

Ces traitements sont délicats à mettre en œuvre. En revanche, nous pouvons **estimer les rapports signal-bruit à l'aide de calculs** sans mesurage. Nous pouvons aussi considérer que dans le cas d'une **communication directe**, les positions du locuteur et de l'auditeur sont généralement proches. Les propriétés acoustiques de l'environnement peuvent, par conséquent, n'avoir **qu'un effet limité** sur l'intelligibilité.

De cette façon, nous pouvons **utiliser cette méthode pour prédire l'intelligibilité à partir** :

- du niveau de bruit perçu en bande d'octave,
- du niveau du signal perçu en bande d'octave,
- de la distance entre les interlocuteurs.

Calcul à partir d'une estimation du signal sur bruit en bande d'octave :

Selon le concept STI, les rapports signal sur bruit dans la gamme -15 dB à +15 dB sont liés de façon linéaire aux contributions à l'intelligibilité dans la gamme 0 à 1. Par conséquent, on convertit le rapport signal sur bruit réel en un indice de transmission correspondant (TI_k), spécifique à la bande d'octave k selon l'équation suivante :

$$TI_k = \frac{SNR_{\text{dB}} + 15}{30}$$

L'indice révisé de transmission de la parole est obtenu en effectuant une addition pondérée des indices de transfert de modulation pour les sept bandes d'octaves avec les corrections de redondance correspondantes.

$$STIr = \sum_{k=1}^7 \alpha_k TI_k - \sum_{k=1}^6 \beta_k \sqrt{TI_k \times TI_{k+1}}$$

où :

les facteurs α_k sont les facteurs de pondération d'octave ;

β_k sont les facteurs de correction de redondance.

Ci-dessous un exemple de calcul du STIr

	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz	8000Hz
Bruit utilisé dBA	70.4	74.2	72.4	69.9	60	58.5	39.3
Voix homme dBA	59	67	58.3	61.7	59.9	59.3	55.1
Affaiblissement du protecteur	8.7	9.1	12.1	19.2	27.4	31.4	39.1
Signal/bruit à l'oreille	-11.40	-7.20	-14.10	-8.20	-0.10	0.80	15.80
TI Indice de Transmission	0.12	0.26	0.03	0.23	0.50	0.53	1.00
STIr	0.42						

Tableau 7 : exemple de calcul de l'indice STIr en fonction du niveau du bruit et du signal en bande d'octave à l'oreille de l'auditeur. Les indices de transmission sont calculés pour chaque bande d'octave. Le STIr est une addition pondérée des IT.

3.1.3 Méthode STI avec prise en compte du masquage et des seuils d'audition

Comme nous l'avons vu précédemment, nous pouvons utiliser le STI sans prendre en compte les propriétés acoustiques de l'environnement. De cette façon, l'indice d'intelligibilité est calculé uniquement à partir du spectre du bruit, du spectre du signal et de la distance entre les interlocuteurs. Autrement dit, le STI est calculé uniquement à partir du rapport signal sur bruit perçu par l'utilisateur par bande d'octave.

Dans le cas des filtres acoustiques classiques dit linéaires (uniformes ou non), quelle que soit la pente du filtre passif utilisé, le signal de bruit et le signal de voix subiront le même filtrage. Ainsi le coefficient signal sur bruit restera inchangé, quel que soit le protecteur linéaire utilisé.

Exemple sur la bande d'octave 1000Hz, sur rapport signal sur bruit de 20dB :



C'est pourquoi le STI tel que défini précédemment ne peut pas permettre de prendre en compte la pente d'affaiblissement d'un protecteur.

Pour cela, il faut prendre en compte le masquage fréquentiel et le seuil d'audibilité tels que décrits en compte dans la norme NF EN 60628-16.

En effet, un bruit très élevé va entraîner un masquage plus important de l'information apporté par la voix. De même si le signal de voix est trop faible, l'auditeur peut manquer une partie de l'information (ce signal peut être sous le seuil d'audition de l'auditeur) et ceci quel que soit le rapport signal sur bruit.

Au niveau calculatoire, la méthode est de calculer l'indice de modulation m_k pour chaque bande d'octave à partir du rapport signal sur bruit précédemment estimé.

$$m_k = \frac{10^{\text{SNR} / 10}}{1 + 10^{\text{SNR} / 10}}$$

Le masquage auditif et le seuil d'audition entraînent une réduction de l'indice de modulation :

$$m'_k = m_k \frac{l_k}{l_k + l_{am,k} + l_{rs,k}}$$

- I_k représente le niveau sonore total (bruit et voix) perçu par l'auditeur,
- $I_{rs,k}$ représente le facteur de seuil d'audition par bande d'octave, disponible dans la norme IEC 60268-16,
- $I_{am,k}$ représente l'intensité du signal masquant sur la bande d'octave k.

L'effet de masquage, telle que modélisé dans l'approche du STI, ne dépend pas de la bande de fréquence considérée, mais du niveau sonore. Par exemple, pour un niveau sonore perçu entre 55 et 65 dB, la pente de masquage diminue avec 35 dB par octave. Le niveau sonore total perçu (bruit et signal dans notre cas) sur une bande d'octave génère un effet de masquage sur la bande d'octave adjacente immédiatement supérieure. De cette façon nous pouvons calculer $I_{am,k}$, l'intensité du signal de masquage.

A partir de l'indice de modulation m_k révisé, nous recalculons le rapport signal sur bruit effectif pour l'auditeur :

$$SNR_k = 10 \log \frac{m'_k}{1 - m'_k} \text{ dB}$$

Les nouveaux indices de transmission sont recalculés pour obtenir l'indice STI corrigé.

	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz	8000Hz
Bruit utilisé dB(A)	70.4	74.2	72.4	69.9	60	58.5	39.3
Voix homme dB(A)	59.0	67.0	58.3	61.7	59.9	59.3	55.1
Affaiblissement du protecteur	8.7	9.1	12.1	19.2	27.4	31.4	39.1
Signal/Bruit à l'oreille	-11.40	-7.20	-14.10	-8.20	-0.10	0.80	15.80
TI Indice de Transmission	0.12	0.26	0.03	0.23	0.50	0.53	1.00
STIr brut	0.42						
Indice de modulation m_k	0.07	0.16	0.04	0.13	0.49	0.55	0.97
Indice de modulation m'_k revu	0.04	0.11	0.03	0.12	0.41	0.43	0.56
Signal/Bruit revu	-13.94	-8.93	-14.92	-8.79	-1.61	-1.18	1.02
IT revu	0.04	0.20	0.00	0.21	0.45	0.46	0.53
STIr revu	0.33						

Tableau 8 : exemple de calcul de l'indice STIr revu. Les indices de modulation sont recalculés pour prendre en compte le masquage et les seuils d'audition.

Ce nouvel indicateur est donc calculé à partir du niveau de bruit en bande d'octave, du niveau de signal émis par un locuteur en bande d'octave, de la distance entre les interlocuteurs et de l'affaiblissement du protecteur en bande d'octave. Il nous permet de prendre en compte en plus du rapport signal sur bruit perçu par l'auditeur, les effets de masquage et de seuil d'audition affectés par le port de protections auditives.

3.2 Les tests subjectifs

Dans le domaine de l'audiométrie vocale, on distingue les tests d'intelligibilité et les tests phonétiques.

3.2.1 Tests phonétiques

Ils servent à étudier la perception des phonèmes.

Le matériel utilisé peut être des mots (Listes Cochléaires de Lafon) ou des logatomes ; on utilise des listes phonétiquement équilibrées et homogènes pour une analyse fine.

3.2.2 Tests d'intelligibilité

Ces tests servent à évaluer la compréhension globale de signaux de parole. On trouve :

→ **le test de mots CVCEQB** (3 lettres – Consonne-Voyelle-Consonne)

Mots dépourvus de sens

Phonétiquement équilibrés pour représenter la proportion dans la langue

→ **le test de mots monosyllabiques**

Mots ayant un sens

Phonétiquement équilibrés pour représenter la proportion dans la langue

Ces listes sont peu utilisées car elles sont difficiles

→ **le test de mots et ? dissyllabique (listes de Fournier)**

Mots ayant un sens

Phonétiquement équilibrés pour représenter la proportion dans la langue

Ces listes sont les plus utilisées en pratique courante

→ **Un test de phrases**

En règle générale, les tests de phrases ne sont pas recommandés pour évaluer les systèmes de transmission, dans la mesure où les connaissances de l'auditeur diffèrent en matière de :

- grammaire,
- de signification,
- de syntaxe de la phrase influençant les résultats

De plus ces listes sont les plus faciles.

Une autre difficulté est la **construction d'un grand nombre de phrases phonétiquement représentatives** de la parole et présentant une complexité bien définie.

Dans le cadre de notre test subjectif, nous utiliserons les listes de Fournier fournies sur CD par le Collège National d'Audioprothèse.

3.3 Relation entre les méthodes

Les résultats des différentes méthodes objectives et subjectives ont été comparés. La norme ISO9921 propose le tableau ci-dessous, donnant la relation entre différents indices d'intelligibilité (NF EN ISO 9921, 2004) :

Évaluation de l'intelligibilité <i>a</i>	Note par phrase <i>b</i> %	Note par type de mots phonétiquement équilibrés ayant un sens <i>c</i> %	Note par type de mots CVCEQB dépourvus de sens %	STI %	SIL <i>d</i>	SII <i>d, e</i>
Excellente	100	> 98	> 81	> 0,75	21	-
Bonne	100	93 à 98	70 à 81	0,60 à 0,75	15 à 21	> 0,75
Correcte	100	80 à 93	53 à 70	0,45 à 0,60	10 à 15	-
Faible	70 à 100	60 à 80	31 à 53	0,30 à 0,45	3 à 10	< 0,45
Mauvaise	< 70	< 60	< 31	< 0,30	< 3	-

Tableau 9: évaluation de l'intelligibilité et relations entre différents indices d'intelligibilité selon la norme ISO9921, se reporter à la norme pour les annotations a,b,c,d et e.

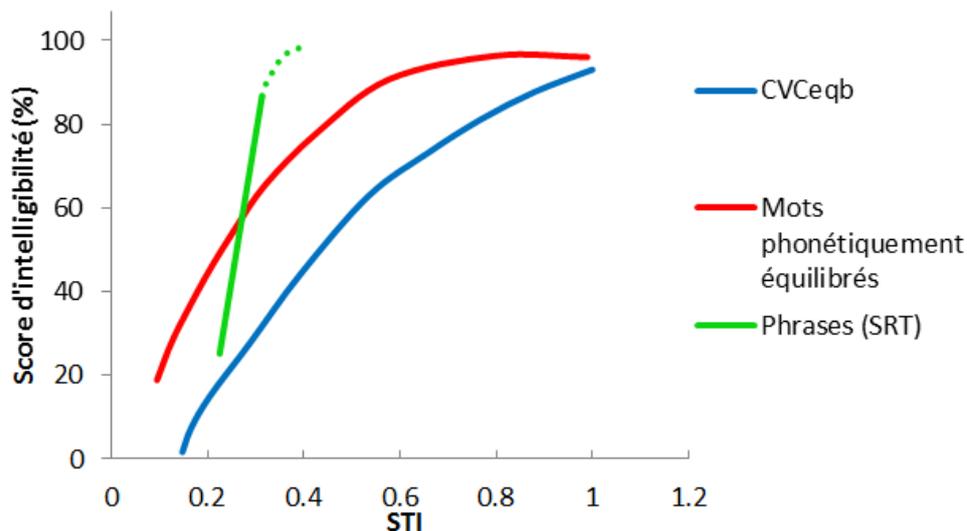


Figure 11 : relation entre le STI et les tests d'intelligibilité subjectifs, données issues de l'ISO 9921

Les courbes suivantes mettent en relation le STI avec la plupart des méthodes subjectives.

Protocole de test

Pour évaluer l'influence du port de protecteurs auditifs sur l'intelligibilité d'une communication dans le bruit, nous avons mis en place un test subjectif.

22 sujets ont été exposés à des environnements bruyants stationnaires avec différents protecteurs auditifs considérés « uniformes » et d'autres « non uniformes » par le fabricant.

Un signal vocal préenregistré diffuse des listes de mots. Le sujet écrit sur papier le mot entendu. Le score d'intelligibilité obtenu est évalué en % de mots reconnus.

3.3.1 Echantillons testés

Nous avons testé 6 modèles de protecteurs auditifs A22, A26, A33, B16, B23, B26. Les protections de la gamme B sont considérées à réponse uniforme, contrairement aux protections de la gamme A.

Ci-dessous les caractéristiques des protections en test :

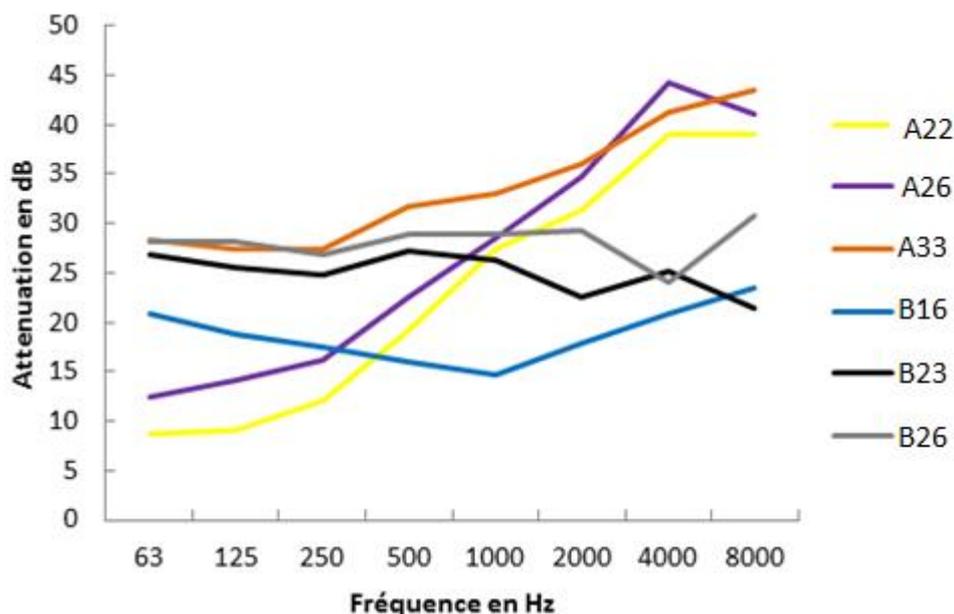


Figure 12 : affaiblissements moyens certifiés des protecteurs testés en bande d'octave

	Aff. SNR	Unif. PENTE
A22	22	17
A26	26	16
A33	33	7
B16	16	2
B23	23	-3
B26	26	-1

Tableau 10 : SNR et pentes des filtres

L'ordre dans lequel les protections sont testées par les sujets est aléatoire. Avant de commencer le test des protections, le sujet est entraîné à l'aide de quelques listes de mise en condition.

3.3.2 Population

La population des sujets est constituée de 22 sujets normo entendants âgés de 21 à 41 ans, composée de 6 femmes et 16 hommes ayant une bonne maîtrise de la langue française et une bonne audition.

3.3.3 Dispositif expérimental

Le matériel de paroles préenregistré est diffusé sur un haut-parleur à 1 mètre en face de l'utilisateur. Les bruits préenregistrés sont diffusés sur deux haut-parleurs latéraux.

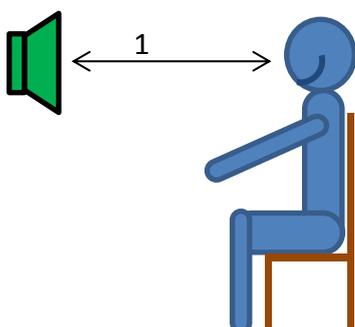


Figure 13 : vue de côté, le sujet s'installe à 1 mètre en face de la source de voix. Assis, le sujet écrit sur une feuille de réponses les mots qu'il comprend.

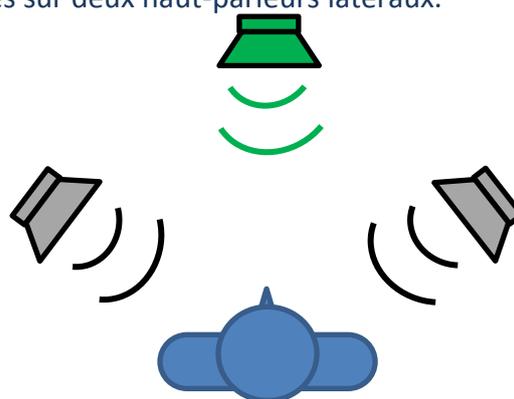


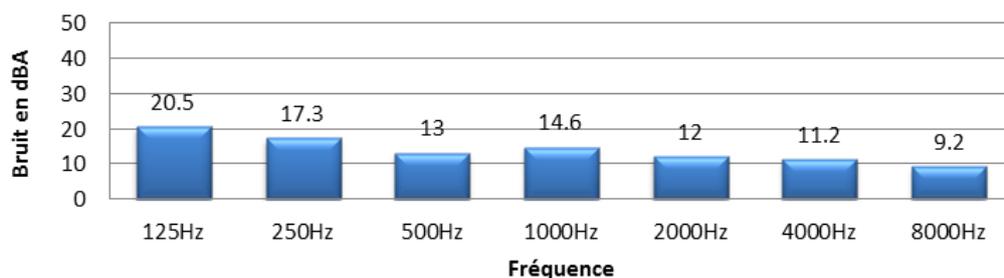
Figure 14 : vue de dessus, pendant le test, le matériel vocal est diffusé en face du sujet, le bruit est diffusé sur deux haut-parleurs identiques.

L'ensemble des mesures de bruit ou de signal vocal a été réalisé en dB(A) par bande d'octave, à l'aide d'un sonomètre intégrateur en positionnant le **microphone au niveau de la tête des sujets**.

Dans ces conditions, le test ne prend pas en compte les indices visuels, la lecture labiale ou le contexte de diffusion du message.

Les tests sont réalisés dans une pièce à isolation acoustique renforcée. En revanche, la pièce n'a pas été conçue pour faire face aux bruits solidiens transmis par le sol.

Le bar graph ci-dessous présente les niveaux de bruit ambiant de la salle au silence (sans ajout artificiel de bruit):



3.3.4 Matériel vocal

Dans le cadre de ce test subjectif, nous avons choisi les listes de Fournier avec voix d'homme fournies sur CD par le Collège National d'Audioprothèse. Ces listes présentent l'avantage d'être phonétiquement représentatives de la langue française. Chaque liste contient 10 mots dissyllabiques ayant un sens. Les mots préenregistrés sont clairement exprimés avec un débit vocal régulier.

Pour l'ensemble de l'étude, nous avons fixé le niveau sonore de la voix à 70dB(A), mesuré au niveau du sujet.

Pour mesurer la voix, les pauses entre les mots diffusés ont été supprimées informatiquement dans le but de mesurer le niveau sonore moyen continu du signal vocal en bande d'octave au niveau du sujet.

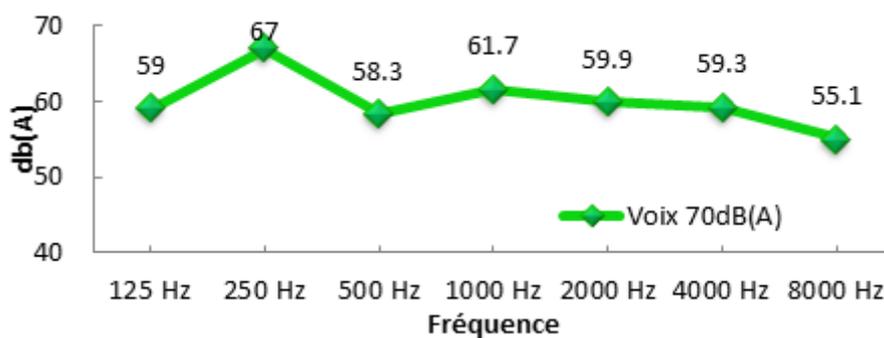


Figure 15 : relevé sonométrique de la voix mesuré en bande d'octave au niveau du sujet. Le niveau en dB(A) est de 70

3.3.5 Environnements bruyants

Chaque protecteur sera testé dans les conditions de bruit ci-dessous :

Il s'agit d'un bruit stationnaire à dominante basse fréquence, préenregistré puis décliné en 8 bruits compris entre 78 et 92 dBA total. Les composantes fréquentielles de ces bruits de test sont présentées ci-dessous :

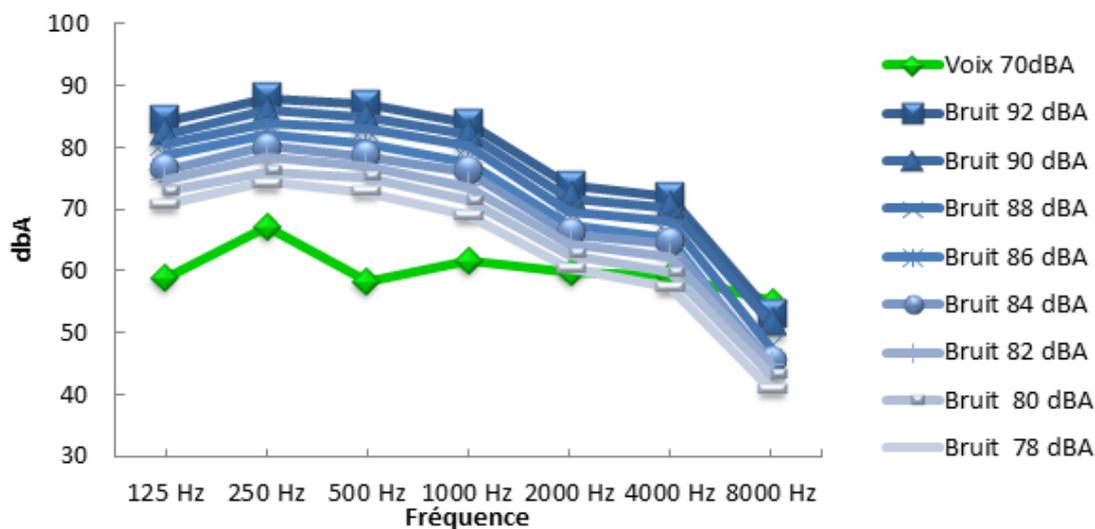


Figure 16: relevés sonométriques des bruits de test mesurés en bande d'octave au niveau du sujet. Le niveau en dB(A) varie de 78 à 92dB

La Figure 17 présente les moyennes sur 22 sujets du % de mots reconnus dans les différents environnements bruyants, pour chaque protecteur.

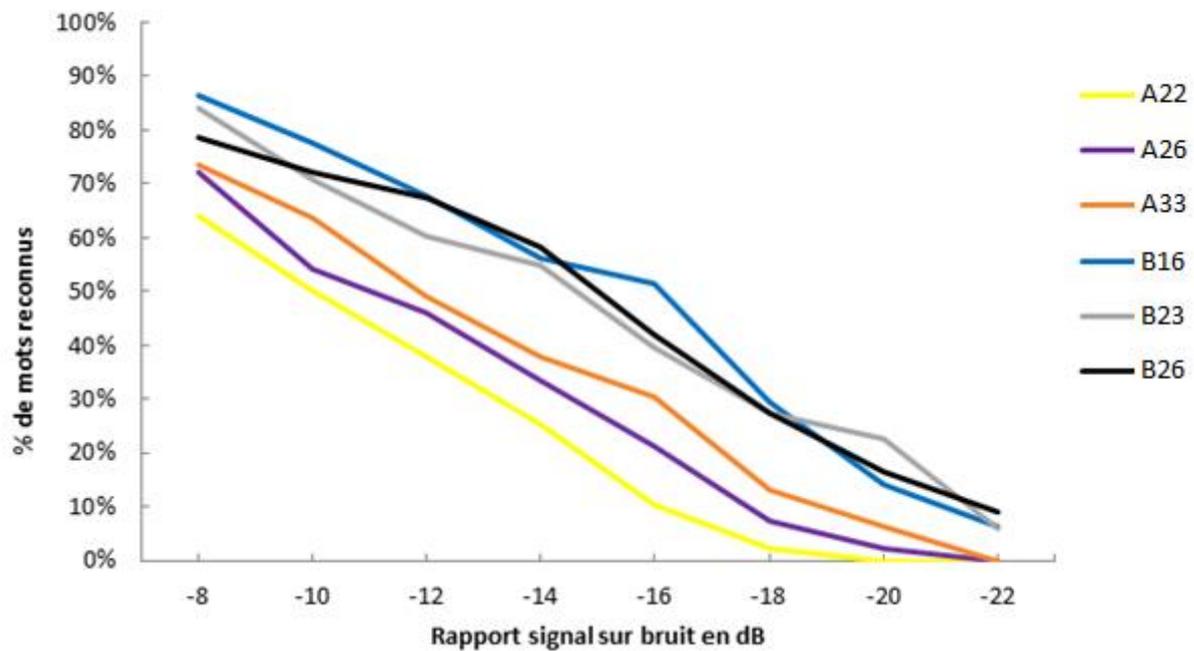


Figure 17 : moyennes sur 22 sujets du % de mots reconnus dans plusieurs niveaux de bruit, le signal de voix est de 70dB(A) à 1m, à hauteur de la tête de l'auditeur.

On observe un impact réel du type d'affaiblissement sur la reconnaissance des mots. L'intelligibilité décroît linéairement en fonction de l'augmentation du niveau de bruit.

Rapidement nous constatons que les protecteurs à réponse uniforme ont permis d'obtenir une meilleure intelligibilité.

Nous remarquons aussi que quelle que soit l'atténuation du protecteur à réponse uniforme testé, les scores d'intelligibilité se confondent (voir graphique ci-dessous).

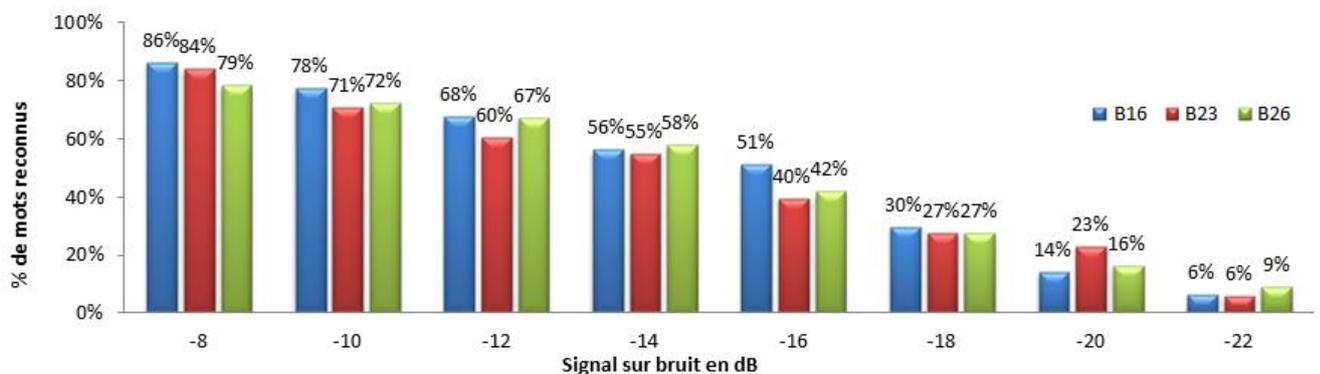


Figure 18 : % de mots reconnus dans plusieurs niveaux de bruit, le signal de voix est de 70dB(A) à 1m de l'auditeur.

Comparons les protecteurs d'affaiblissement équivalent mais de pente différente :

- 1) Les protecteurs B26 et A26 ont les mêmes moyennes d'affaiblissement certifiées (SNR de 26dB). En revanche, leurs pentes d'atténuation sont différentes (16 pour le A26 et -1 pour le B26).

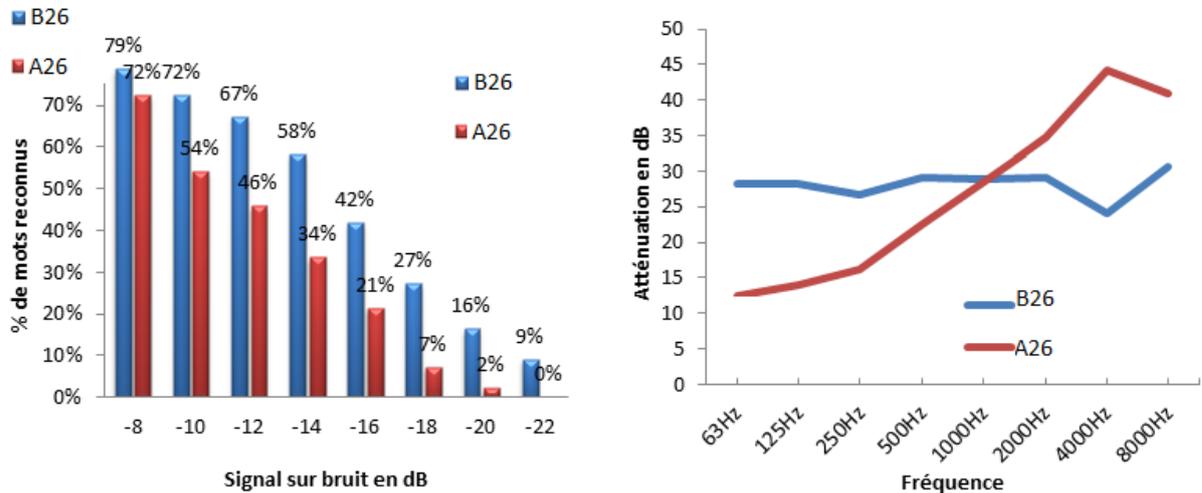


Figure 19 : A gauche % de mots reconnus dans plusieurs niveaux de bruit pour les protecteurs B26 et A26
A droite allures de moyennes d'atténuation certifiées en dB par bande d'octave pour les protecteurs B26 et A26

Les protecteurs B23 et A22 ont des atténuations certifiées très proches (respectivement 23 et 22dB de SNR), en revanche leurs pentes d'atténuation sont différentes (17 pour le A22 et -3 pour le B23).

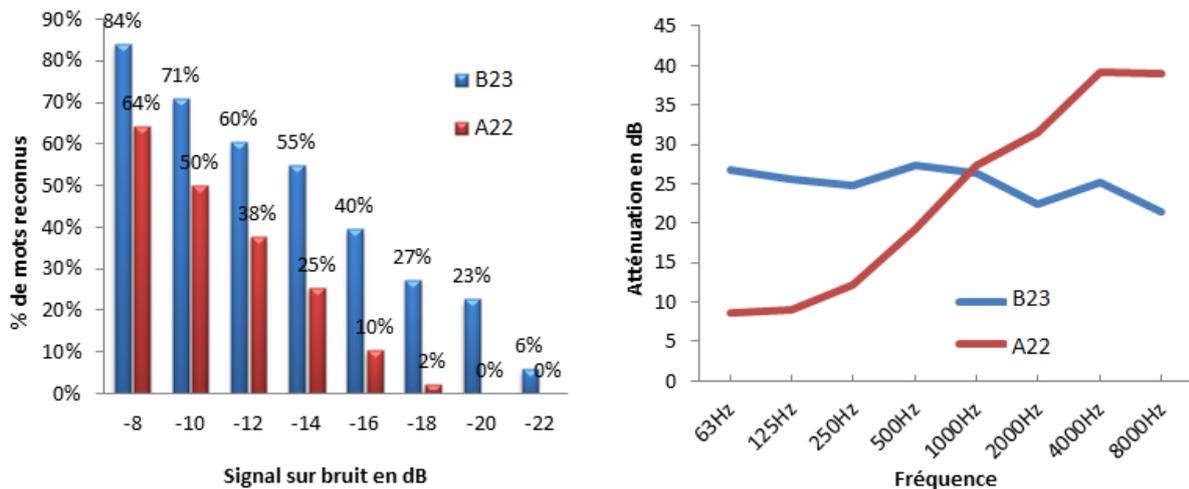


Figure 20 : A gauche : le % de mots reconnus dans plusieurs niveaux de bruit pour les protecteurs B23 et A22
A droite : allures de moyennes d'atténuation certifiées (CRITT) en dB par bande d'octave pour les protecteurs B23 et A22

On observe une **intelligibilité réduite d'environ 20%** avec les protecteurs à réponse non **uniforme** pour un même affaiblissement certifié.

3.4 Modélisation simple des résultats

Nous cherchons un modèle mathématique très simple, approchant les résultats observés. Les résultats obtenus présentent des caractéristiques marquées, nous allons tenter de trouver un modèle mathématique simple représentant ces observations.

3.4.1 Première approximation

On assimile les résultats à des fonctions affines

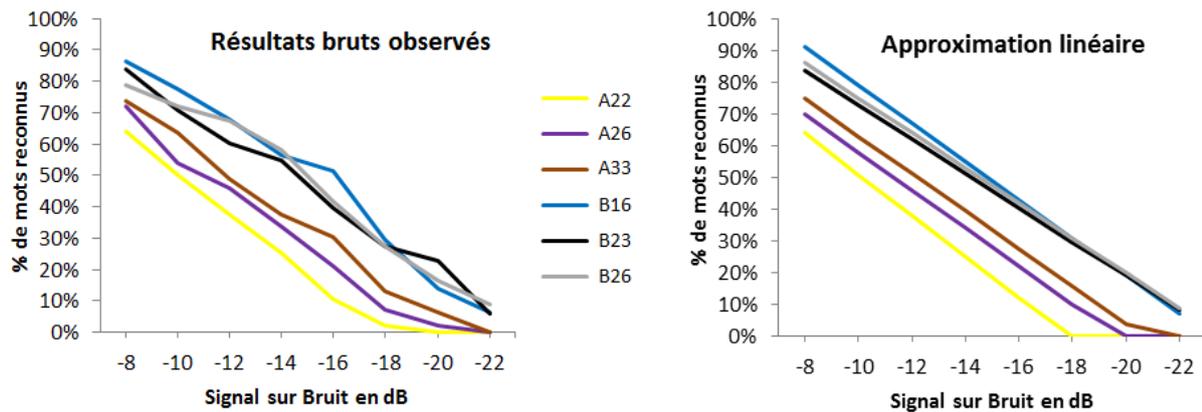


Figure 21 : représentation des résultats sous forme brute et sous forme linéaire

3.4.2 Seconde approximation

On considère les pentes des courbes équivalentes

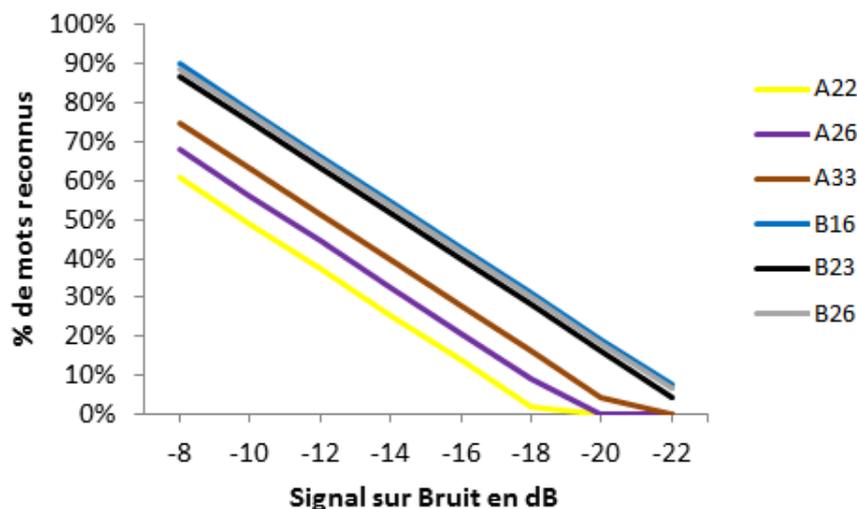


Figure 22 : représentation des résultats sous forme linéaire avec pente équivalente

3.4.3 Troisième approximation

On observe que les résultats d'intelligibilité ne semblent pas corrélés avec l'affaiblissement. En revanche, en comparant les valeurs absolues des pentes d'affaiblissement des orientations

avec les écartements des courbes (ci-dessous), on s'aperçoit que l'intelligibilité est très fortement corrélée à la pente (H-L) de la protection.

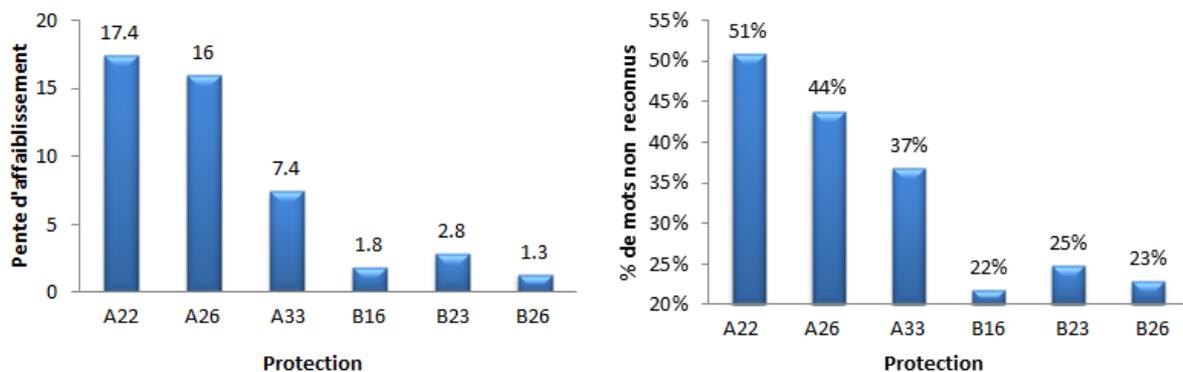


Figure 23 : A gauche : valeurs absolues des pentes d'affaiblissement (H – L) des protecteurs. A droite : le % de mots non reconnus (pour un signal sur bruit de -10 dans cet exemple). Ces données sont obtenues à partir des deux premières approximations

Nous allons faire l'hypothèse que l'intelligibilité est uniquement liée à la pente du protecteur et au rapport signal sur bruit.

3.4.4 Le modèle

La modélisation mathématique ci-dessous donne une estimation des résultats observés.

Pour établir cette formule, nous considérons que les résultats sont proches de fonctions affines de pente fixe et nous faisons également l'hypothèse, d'après nos observations, que l'intelligibilité est uniquement liée à la pente du protecteur et au rapport signal sur bruit.

$$\text{Intelligibilité (en \%)} = \frac{47 - |\text{Pente}|}{58} + 0,06 * (10 + \text{Signal(dBA)} - \text{Bruit(dBA)})$$

Nous pouvons comparer (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**) les résultats bruts observés (traits pleins) avec les calculs du modèle défini dans la formule ci-dessus (pointillés) :

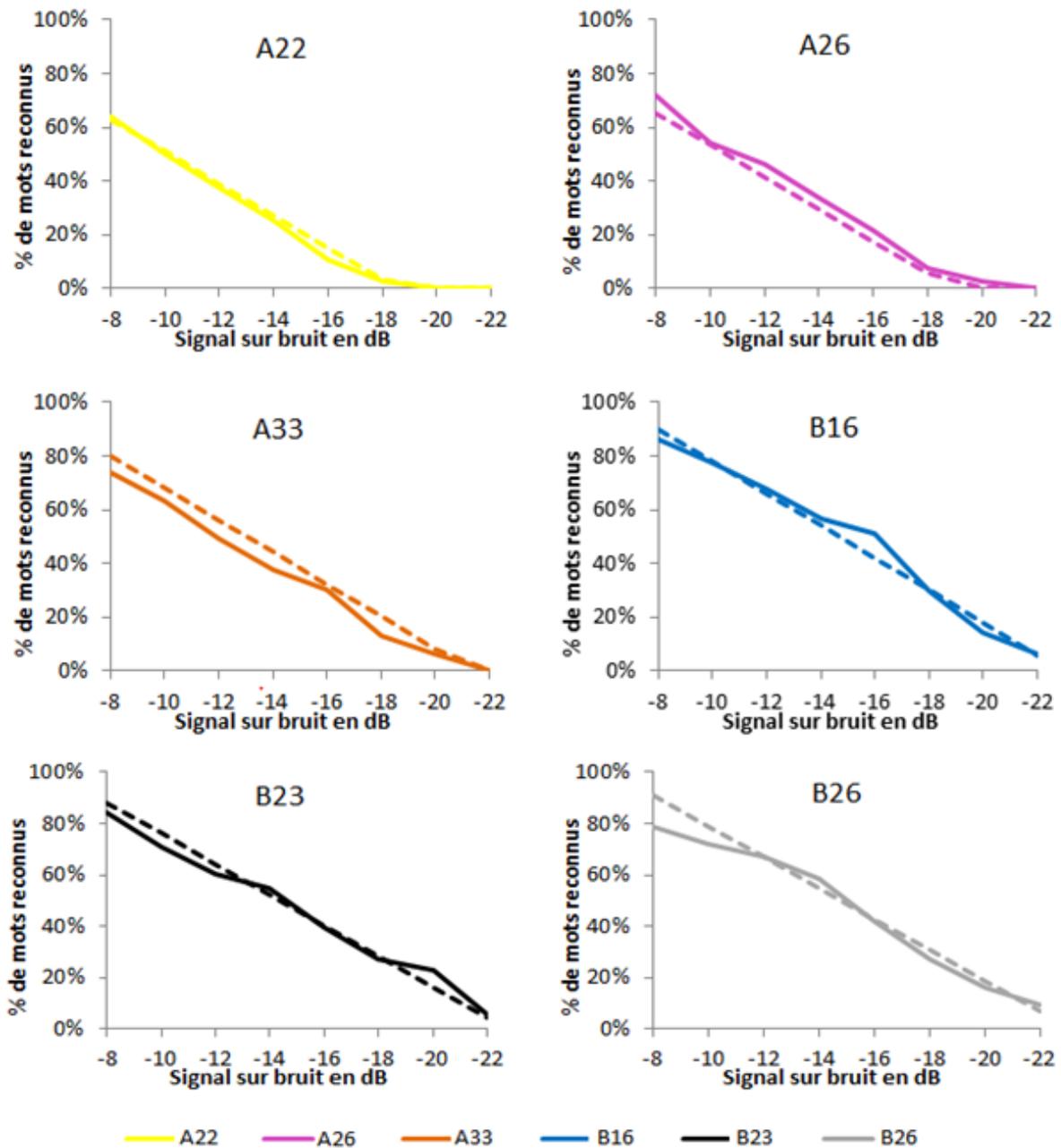


Figure 24 : tracé des résultats bruts (trait plein) et calculé avec le modèle (pointillés)

Le modèle défini donne des approximations relativement représentatives des mesures observées compte tenu de l'hypothèse forte selon laquelle l'intelligibilité est uniquement liée à la pente du protecteur et au rapport signal sur bruit. De ce fait, les résultats de certaines protections sont légèrement surévalués (A33), et d'autres sous-évalués (A26).

4 Comparaison des résultats avec le STI

Comme décrit dans la partie 3.1, le STI permet de prédire l'intelligibilité dans une scène donnée. Il prend en compte, en plus du rapport signal sur bruit perçu par l'auditeur, les effets de masquage et de seuil d'audition affectés par le port de protections auditives.

Cet indicateur est calculé à partir :

- du niveau de bruit en bande d'octave au niveau de l'oreille du sujet
- du niveau de signal émis par un locuteur au niveau de l'oreille du sujet
- de l'affaiblissement du protecteur en bande d'octave.

4.1 Simulation des conditions de test

Nous cherchons à comparer les méthodes STI et notre test subjectif sur plusieurs sujets. Les paramètres utilisés pour le calcul du STI sont donc issus des conditions de test de la mesure subjective, à savoir :

- le signal vocal est une voix d'homme, le débit vocal et l'intensité sonore sont réguliers. Le niveau moyen des mots prononcés a été mesuré à 70dBA au niveau de l'oreille du sujet (voir 4.1.4 matériel vocal).
- le bruit est à dominante basse fréquence, diffusé à des niveaux de 78 à 92dBA (Voir 4.1.5 Environnements bruyants)
- nous utilisons les moyennes d'affaiblissement certifiées des protecteurs A22, A26, A33, B16, B23, B26.

4.2 Résultats

On observe sur la **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** le STI_r calculé par filtre en fonction du signal :

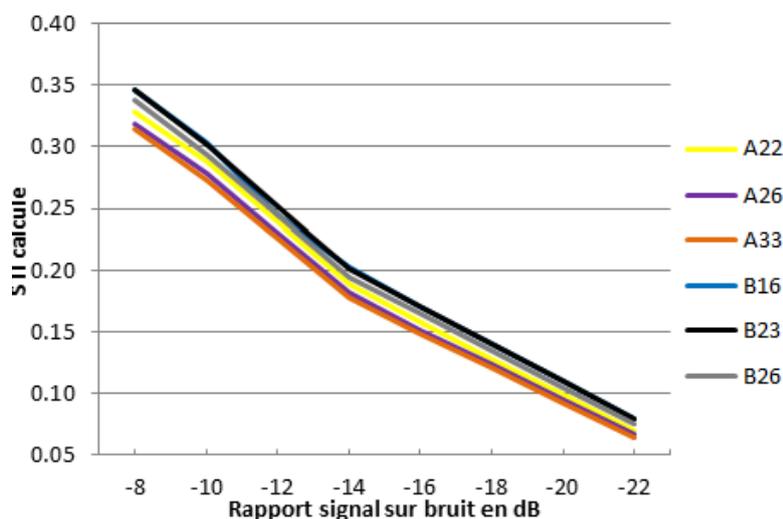


Figure 25 : STI calculé en fonction du rapport signal sur bruit avec différents protecteurs

On observe ici que les scores d'intelligibilité des différents filtres sont très proches. La méthode STI utilisée ici ne traduit pas l'influence de la pente sur l'intelligibilité observée dans la partie 4 : le test subjectif.

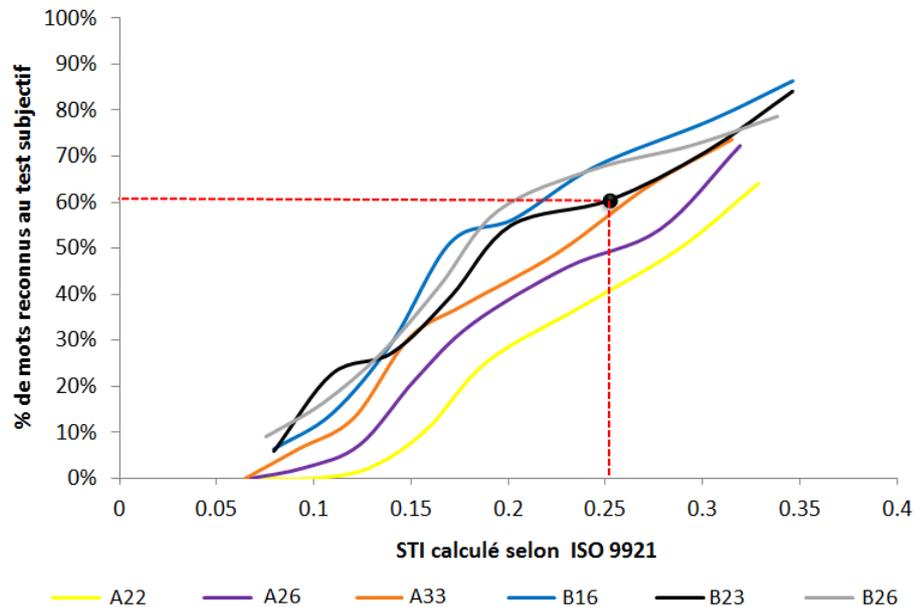


Figure 26: relation entre le % de mots reconnus au test subjectif et le calcul du STIr dans les mêmes conditions. La courbe en pointillés rouges représente le rapport STI et % de mots reconnus présenté dans la norme ISO9921.

La **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** compare les résultats des deux méthodes testées : test subjectif et STIr.

Pour exemple, prenons une mesure avec le filtre B23. Avec un signal de voix à 70db(A) et un bruit à 82dB(A), nous avons obtenu sur 22 sujets un pourcentage de mots reconnus moyen de 60% au test subjectif. A partir de ces conditions (voix, bruit et protecteur) nous calculons le STIr correspondant tel que défini dans la norme, c'est-à-dire 0.25. Pour le filtre B23, un STI de 0.25 correspond à une intelligibilité de 60%, or pour le filtre A22, un STI de 0.25 correspond à une intelligibilité de 40%.

On remarque que le rapport entre les deux méthodes est différent en fonction du filtre testé.

Bien que l'on intègre des corrections liées au masquage et aux seuils d'audition dans le calcul du STIr, cet indicateur **STIr ne parvient pas à retranscrire nos observations et notamment l'influence de la pente d'affaiblissement du protecteur.**

5 Recherche d'une méthode de prédiction de l'intelligibilité

Nous cherchons un indice de substitution au STIr, adapté aux protections auditives et basé sur nos observations.

Voici une méthode simple en 2 étapes :

- estimation du signal sur bruit à partir du bruit ambiant (basé sur la norme ISO9921 et le SIL),
- estimation du % de mots reconnus (basée sur nos observations).

1) **Effet Lombard** (Voir 3.1.1.2.1 : prise en compte de l'effet Lombard) :

$$\text{Effort vocal} = 0,57 * \text{Bruit} + 30$$

2) **Effet du protecteur sur le locuteur** (Voir 3.1.1.2.1.1 : prise en compte du protecteur) :

$$\text{Effort vocal}' = \text{Effort vocal} - 3\text{dB}$$

3) **Effet de la distance entre les interlocuteurs** (Voir 3.1.1.2.1.3/ 4 : prise en compte de la distance entre les interlocuteurs) :

$$\text{Niveau de parole à x mètres} = \text{Effort vocal}' - 20 \log (x)$$

4) **Calcul de l'estimation de % de mots reconnus** (Voir 4.3 : modélisation simple des résultats)

$$\text{Estimation du \% d'intelligibilité} = \frac{47 - |\text{Pente}|}{58} + 0,06 * (10 + \text{Signal(dBA)} - \text{Bruit(dBA)})$$

6 Conclusion

Nous avons tenté de mieux comprendre les principaux phénomènes qui entrent en jeu dans la communication et la transmission d'information dans le bruit, notamment les composantes liées au bruit ambiant, au signal émis par le locuteur, à l'auditeur et à la configuration de l'environnement lorsque l'auditeur est équipé de protections auditives.

Le compte rendu de (Suter 1992 [6]) met effectivement en évidence que, dans certaines conditions, les protecteurs auditifs peuvent améliorer la reconnaissance de parole, en particulier dans les environnements de bruit élevé, lorsque l'auditeur est normo entendant (Rink 1979 [15]) et porte des protections (et non le locuteur) (Kryter 1946 [9]). Cette amélioration dans les niveaux de bruit élevés s'explique par l'atténuation équivalente du bruit du signal utile, réduisant ainsi le risque d'une distorsion auditive due à un élargissement du filtre auditif, qui tend à se produire pour des niveaux sonores élevés. (Coleman et al, 1984 [18]). Il y a également au-dessus de 80 dB(A) une croissance non linéaire du masquage qui entre en jeu. Ainsi en réduisant de la même façon les composantes de bruit et de la parole, le port de protections auditives ne doit pas engendrer de perte d'information spectrale, mais en revanche permettre la réduction de la distorsion et du masquage, entraînant une meilleure intelligibilité. Cependant, la situation n'est pas toujours aussi satisfaisante. **La plupart des protecteurs auditifs sont à réponse non uniforme et réduisent les hautes fréquences beaucoup plus que les basses fréquences.** Ainsi, les caractéristiques spectrales du signal ayant été modifiées, cela donne la possibilité à l'énergie des basses fréquences de masquer les composantes des hautes fréquences.

Selon Lazarus (1983 [13]), plus la pente d'atténuation par octave de la protection auditive **est élevée, plus grande sera la perte d'audibilité du signal.** Le phénomène s'accroît si le bruit est à dominante basses et moyennes fréquences et le signal à dominante hautes fréquences, de même, lorsque l'utilisateur du protecteur auditif est malentendant. Dans ce dernier cas, même un protecteur à forte atténuation avec une atténuation relativement plate peut réduire le niveau du **signal au-dessous du niveau de seuil d'audition** de l'auditeur. Cette éventualité est plus probable avec un filtre non uniforme.

Nous avons cherché à observer l'influence du protecteur et plus particulièrement de sa pente d'affaiblissement sur l'intelligibilité. Nous avons confronté deux méthodes d'évaluation de l'intelligibilité capables de prendre en compte le paramètre de la pente des protecteurs auditifs, un test subjectif de reconnaissance de mots dans le bruit et le STIr, une méthode objective de prédiction dans les mêmes conditions.

A l'aide d'un test subjectif sur 22 individus, nous avons **observé une augmentation d'environ 20% de mots reconnus avec les protections à réponse uniforme**, en comparaison avec les protections à réponse non uniforme dans les mêmes niveaux d'atténuation.

Les scores d'intelligibilité en % de mots reconnus décroissent de façon linéaire en fonction de l'augmentation du bruit par rapport au signal de parole en dB, et ceci dans les mêmes proportions, quel que soit le protecteur utilisé. Dans les mêmes conditions, le calcul du STIr ne traduit pas ces observations, les filtres ne se différencient pas suffisamment.

7 Bibliographie

- [1] J. G. Casali et G. S. Robinson, Auditory Systems Laboratory - Speech communications and signal detection in noise, 2000.
- [2] R. Héту, Mismatches between audiotry demands and capacities in the industrial work environment, *Audiology*, 33 :1–14, 1994.
- [3] J. Pickett, Effects of vocal force on the intelligibility of speech sounds, *The journal of the acoustical society of america*, 28(5) :902–905., 1956.
- [4] J. C. Webster, Effects of noise on speech, 1979.
- [5] K. D. Kryter, *The effects of noise on man*, 1985.
- [6] A. H. Suter, *Communication and Job Performance in Noise : A Review*, ASHA Monographs. 1992 Nov;(28):1-84., 1992.
- [7] K. Howell et A. M. Martin, An investigation of the effects of hearing protectors on vocal communication in noise, *Journal of the Acoustical Society of America*, 41, 181-196, 1975.
- [8] H. Hörmann, G. Lazarus-Mainka, M. Schubeirus et H. Lazarus, The effect of noise and the wearing of ear protectors on verbal communication., *Noise Control Engineering*, 23.69-77, 1984.
- [9] K. D. Kryter, Effects of ear protective devices on the intelligibility of speech in noise, *Journal of the Acoustical Society of America*, 18, 413-417, 1946.
- [10] G. Robinson et J. G. Casali, *Speech communications and signal detection in noise*, American Industrial Hygiene Association (AIHA) Press, 5th edition edition, 2000.
- [11] S. A. Gelfand, *Hearing : an introduction to psychological and physiological acoustics*, Marcel Dekker, New York, 4th edition. Stanley A. Gelfand. ill, 2004.
- [12] A. M. Martin, K. Howell et M. C. Lower, Hearing protection on communication in noise, S. D. G. Stephens (Ed.), *Disorders of auditory function II*. London : Academic Press, 1976.
- [13] H. Lazarus, The effect of hearing protectors on the perception of acoustic signals., *Zentralblatt fur Arbeitsmedizin*, 30, 204-212. , 1983.
- [14] H. Tran Quoc et R. Héту, La planification de la signalisation acoustique en milieu industriel : critère de conception des avertisseurs sonores de danger, *Acoustique canadienne*, 24(2) :3–17, 1996.
- [15] T. L. Rink, Hearing Protection and Speech Discrimination in Hearing-Impaired Persons, *Sound and Vibration* 13(1), 22-25, 1979.
- [16] J. J. Delétré, *Mémento comprendre l'acoustique appliquée*, École d'architecture de Grenoble - 2001, 2001.
- [17] H. J. M. Steeneken et T. Houtgast, *Basics of the STI measuring method*, 2002.
- [18] G. J. Coleman, R. J. Graves, S. G. Collier, D. Golding, A. G. Nicholl, G. C. Simpson, K. F.

Sweetland et C. F. Talbot, Communications in noisy environments, Institute of Occupational Medicine, 1984.

- [19] G. Nexer, Profils d'affaiblissement des protecteurs individuels contre le bruit sur mesure, 2011.
- [20] C. Le Cocq, Communication dans le bruit : perception de sa propre voix et rehaussement de parole, Ecole de technologie supérieure université du Québec, 2010.
- [21] R. H. Ehmer, Masking Patterns of Tones, Journal of the Acoustical Society of America. 31, 1115 , 1958.
- [22] E. Phan Chan The, Le bruit : notions de base en ergonomie-métriologie dans le cadre de la pluridisciplinarité, ANMTEPH, n°55, 15/12/2003, pp. 5-11, 2003.

Annexe 1 : valeurs d'affaiblissement des PICB cités dans l'étude

A22

Fréquences en Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Affaiblissement moyen (dB)	8,7	9,1	12,1	19,2	27,4	31,4	39,1	39
Ecart-type (dB)	2,6	3,6	2,5	3,3	2,6	3,3	3,3	3,3
APV (dB)	6,2	5,5	9,6	15,9	24,8	28,1	35,8	35,6
Pente : 17,4	H (dB)	29,1	M (dB)	19,1	L (dB)	11,7	SNR (dB)	22

Tableau 1 : Valeurs d'affaiblissement du protecteur équipé du filtre A22

A26

Fréquences en Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Affaiblissement moyen (dB)	12,4	14,1	16,1	22,5	28,5	34,7	44,3	41
Ecart-type (dB)	5,1	4,6	3	2,5	3,9	3,3	3,1	4,4
APV (dB)	7,3	9,4	13,1	19,9	24,6	31,4	41,2	36,6
Pente : 16	H (dB)	31,3	M (dB)	22,3	L (dB)	15,3	SNR (dB)	26

Tableau 2 : Valeurs d'affaiblissement du protecteur équipé du filtre A26

A33

Fréquences en Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Affaiblissement moyen (dB)	28,3	27,5	27,4	31,8	33	36	41,3	43,5
Ecart-type (dB)	5,3	3,6	3,3	3,9	3,4	2,8	4,2	3,7
APV (dB)	23	23,9	24,2	27,8	29,5	33,3	37,2	39,9
Pente : 7,4	H (dB)	34,2	M (dB)	29,8	L (dB)	26,8	SNR (dB)	33

Tableau 13 : Valeurs d'affaiblissement du protecteur équipé du filtre A33

B16

Fréquences en Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Affaiblissement moyen (dB)	20,8	18,9	17,5	16	14,7	17,8	20,9	23,4
Ecart-type (dB)	3,5	3,9	2,7	3,2	2,4	3,3	4	3,5
APV (dB)	17,3	15	14,8	12,9	12,3	14,5	16,9	19,9
Pente : 1,8	H (dB)	15,4	M (dB)	13,3	L (dB)	13,6	SNR (dB)	16

Tableau 4 : Valeurs d'affaiblissement du protecteur équipé du filtre B16

B23

Fréquences en Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Affaiblissement moyen (dB)	26,8	25,6	24,8	27,3	26,3	22,5	25,2	21,4
Ecart-type (dB)	4,2	2,9	2,5	2,2	1,6	2,1	2,6	3,8
APV (dB)	22,7	22,7	22,3	25	24,7	20,5	22,6	17,6
Pente : 2,8	H (dB)	20,3	M (dB)	22,9	L (dB)	23,1	SNR (dB)	23

Tableau 5 : Valeurs d'affaiblissement du protecteur équipé du filtre B23

B26

Fréquences en Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Affaiblissement moyen (dB)	28,2	28,2	26,8	29	28,9	29,2	24,1	30,7
Ecart-type (dB)	5,9	4	2,6	3,3	3,2	3,9	3,1	2,9
APV (dB)	22,3	24,1	24,2	25,7	25,7	25,4	21	27,7
Pente : 1,3	H (dB)	23,5	M (dB)	24,8	L (dB)	24,8	SNR (dB)	26

Tableau 6 : Valeurs d'affaiblissement du protecteur équipé du filtre B26