

INFLUENCE DE LA PERTE AUDITIVE ET DU PORT DE PROTECTEURS AUDITIFS SUR L'INSTALLATION D'AVERTISSEURS SONORES EN MILIEUX DE TRAVAIL BRUYANTS

Giguère C., Laroche C., Al Osman R. et Zheng Y.

Programme d'audiologie et d'orthophonie, Université d'Ottawa, Ottawa (Ontario), K1H 8M5, Canada
cgiguere@uottawa.ca

ABSTRACT

Acoustic warning signals are often necessary in industrial settings to promptly alert workers of events that can compromise safety. However, the perception of warning signals in noisy settings depends on many factors, including the warning sound levels relative to the background noise, the use of hearing protectors, and the workers' hearing status. Moreover, the number and location of warning devices on the walls and ceiling of an industrial room are dependent on the sound propagation characteristics of the work area. It is difficult to take into account all these factors without a detailed acoustic and psychoacoustic analysis of the workplace. Recent modeling work allows a more in-depth study of such factors and is used in this study to identify constraints in the installation of warning devices when workers with a range of hearing status operate within the same work environment. In such situations, hearing protection imposes further constraints on the conception of warning signals, especially for workers with hearing loss and in cases of overprotection.

RÉSUMÉ

Des avertisseurs sonores sont souvent nécessaires en milieu industriel pour informer promptement les ouvriers d'événements pouvant compromettre leur sécurité. Or, la perception d'avertisseurs sonores en milieu bruyant dépend de plusieurs facteurs dont le niveau sonore des signaux avertisseurs par rapport au bruit de fond, le port de protecteurs auditifs et le statut auditif des travailleurs. De plus, le choix du nombre de dispositifs avertisseurs à utiliser et de leurs emplacements sur les murs ou le plafond d'un local industriel dépend des caractéristiques de la propagation sonore dans l'aire de travail. Il est difficile de tenir compte de tous ces facteurs sans une analyse acoustique et psychoacoustique détaillée du milieu de travail. De récents travaux de modélisation permettent maintenant d'étudier de manière plus approfondie ces différents facteurs. Dans cette étude, l'utilisation de tels modèles rend possible l'identification des contraintes d'installation d'avertisseurs sonores lorsque des travailleurs avec différents statuts auditifs partagent un même environnement de travail. Dans ces situations, la protection auditive limite davantage la conception d'avertisseurs sonores, particulièrement pour les travailleurs atteints de surdité et les cas de surprotection.

1. INTRODUCTION

Dans plusieurs locaux industriels, le port de protecteurs auditifs est nécessaire afin de maintenir l'exposition des travailleurs au bruit environnant sous les limites réglementaires. L'utilisation de protecteurs contre le bruit en milieu industriel a été amplement étudié [1] et fait l'objet de normes nationales ou internationales [2, 3]. Au Canada, par exemple, la norme CSA Z94.2-02 [2] couvre tous les aspects reliés aux performances acoustiques et physiques des protecteurs ainsi qu'aux méthodes de sélection, d'entretien et de précautions d'emploi en milieu de travail. L'atténuation acoustique du protecteur doit être suffisante pour ramener le niveau d'exposition effectif à l'oreille sous la limite réglementaire (85 ou 90 dBA selon la juridiction provinciale et 87 dBA pour les employés fédéraux au Canada). Les exigences minimales d'atténuation du protecteur pour une situation donnée dépendent alors du niveau global et des caractéristiques spectrales du bruit dans l'aire de travail. La surprotection engendrée par des protecteurs trop fortement atténuants n'est pas recommandée compte tenu du risque d'isoler l'utilisateur de son milieu de travail et de gêner ainsi la communication entre les travailleurs et la perception d'avertisseurs sonores. Des exigences maximales d'atténuation des protecteurs sont donc nécessaires afin de ne pas compromettre la sécurité dans le milieu de travail [4, 5].

Dans cet ordre d'idées, les normes CSA Z94.2-02 [2] et EN 458 [3] recommandent de ramener le niveau d'exposition effectif à l'oreille entre 5 et 10 dB sous le niveau réglementaire, lors du port de protecteur. Donc, si le niveau maximal d'exposition est de 85 dBA selon la réglementation, un protecteur « optimal » résulterait en un niveau d'exposition effectif à l'oreille entre 75 et 80 dBA. Un degré moindre d'atténuation risque d'être insuffisant pour minimiser les effets nocifs du bruit sur l'audition tandis qu'une atténuation plus importante risque d'engendrer de la surprotection. En général, ce principe de sélection des protecteurs est adéquat afin de protéger le travailleur sans l'isoler de son environnement sonore, particulièrement pour les travailleurs avec une audition normale. Malheureusement, aucune norme relative à la sélection des protecteurs ne tient compte directement du statut auditif des travailleurs.

Les travailleurs atteints d'une surdité caus e par l'âge ou par l'exposition préalable au bruit sont davantage susceptibles de se sentir isol es par le port de protecteur que les travailleurs avec audition normale. L'effet combin e de l'atténuation du protecteur et de seuils auditifs  lev es peut rendre inaudibles certains signaux utiles du milieu de travail tels que les avertisseurs sonores, principalement les composantes acoustiques en hautes fréquences [1, 4-7]. La perte auditive affecte aussi la sélectivité fréquentielle, soit la capacité de capter des signaux dans le bruit [8]. Ainsi, les travailleurs affect es par une surdité requièrent un meilleur rapport signal-bruit que les travailleurs avec audition normale. Tel que d emontr e dans une étude récente [9], il devient particulièrement difficile d'installer des avertisseurs sonores en milieu bruyant lorsque des travailleurs affichant différents statuts auditifs et portant des protecteurs partagent une même aire de travail. Un signal avertisseur sonore donn e risque d'être trop fort pour certains travailleurs et trop faible pour d'autres. L'interaction complexe entre les caractéristiques du bruit industriel, l'atténuation des protecteurs auditifs et le statut auditif des travailleurs rend difficile, sans une analyse détaillée, la mise en œuvre de solutions fiables et vérifiables de systèmes d'avertisseurs sonores en milieux de travail bruyants [9, 10].

Deux modèles complémentaires ont récemment été conçus pour faciliter la recherche de solutions d'avertisseurs sonores pour une aire de travail donnée [9, 11]. Un modèle psychoacoustique, Détectson [9], permet de prédire la capacité à détecter des signaux avertisseurs de danger en tenant compte du statut auditif de la population ciblée ou de travailleurs individuels, du bruit de fond dans l'environnement de travail et de l'utilisation de protecteurs auditifs. Ce modèle est utilisé pour établir des cibles sonores aux différents postes de travail dans le local industriel. Ces cibles se situent de 12 à 25 dB au-delà des seuils auditifs absolus ou masqués aux différents postes de travail, selon le statut auditif du travailleur et le protecteur auditif sélectionné. Ensuite, un modèle de propagation sonore, AlarmLocator [11], permet d'automatiser le processus d'installation d'avertisseurs sonores dans le local industriel, afin de satisfaire les cibles sonores produites par Détectson à tous les postes de travail. Ce modèle tient compte de la réverbération acoustique dans le local industriel et de la distance entre les dispositifs avertisseurs et les différents postes de travail. Il permet alors de déterminer le nombre de dispositifs à utiliser, l'emplacement optimal sur les murs du local industriel et la puissance acoustique requise pour différentes composantes fréquentielles du signal avertisseur.

Dans cette étude, les modèles Détectson et AlarmLocator permettent d'analyser systématiquement les contraintes d'installation d'avertisseurs sonores lorsque des travailleurs avec différents statuts auditifs partagent un même environnement de travail. La norme CSA Z94.2-02 [2] est utilisée pour la sélection de protecteurs auditifs à différents postes de travaux simulés et la norme ISO 1999 [12] permet de considérer l'effet de la perte auditive de différents travailleurs exposés au bruit dans le milieu de travail. Les résultats illustrent comment la perte auditive et la surprotection exacerbent les contraintes d'installation d'avertisseurs sonores en milieu de travail.

2. PROCÉDURES

Le cadre général de modélisation menant à l'installation optimale de dispositifs d'avertisseurs sonores est illustré à la figure 1 et consiste en l'intégration des deux modèles informatisés, Détectson et AlarmLocator. Détectson [9] est basé sur l'analyse du bruit dans le milieu industriel et permet de déterminer les caractéristiques acoustiques optimales des signaux avertisseurs (niveau sonore pour chaque composante fréquentielle) pour chaque poste de travail, selon les besoins spécifiques d'un travailleur ou d'un groupe de travailleurs. L'utilisation de Détectson requiert les quatre paramètres d'entrée suivants:

- (1) la distribution spectrale du bruit au poste de travail ;
- (2) l'atténuation offerte par les protecteurs auditifs (si utilisés) ;
- (3) les seuils auditifs absolus du travailleur ;
- (4) les caractéristiques liées à la sélectivité fréquentielle du travailleur.

Les deux derniers paramètres peuvent être mesurés cliniquement ou prédits par Détectson [9] selon l'âge et le sexe du travailleur et l'exposition préalable au bruit dans le milieu de travail. Détectson génère alors une fenêtre de conception ou gamme des niveaux cibles du signal avertisseur à différentes fréquences (entre 125 et 3150 Hz) pour chaque poste de travail à l'étude. Les niveaux cibles inférieurs (NC_{inf}) et supérieurs (NC_{sup}) définissant la fenêtre de conception se situent entre 12 dB et 25 dB au-dessus des seuils de détection prédits pour la perception d'un signal avertisseur selon le bruit, le statut auditif des travailleurs et le port de protecteurs auditifs. Une limite supérieure absolue de 105 dB SPL par bande de tiers d'octave est également imposée. Lors de l'installation de

dispositifs d'alarme, des niveaux entre NC_{inf} et NC_{sup} sont ciblés et, idéalement, au moins 4 composantes fréquentielles du signal avertisseur devraient se retrouver dans la fenêtre de conception [13]. La figure 2 illustre un exemple de fenêtre de conception pour un poste de travail et un signal avertisseur dont 4 des 5 composantes rencontrent les exigences spécifiées par Détectson.

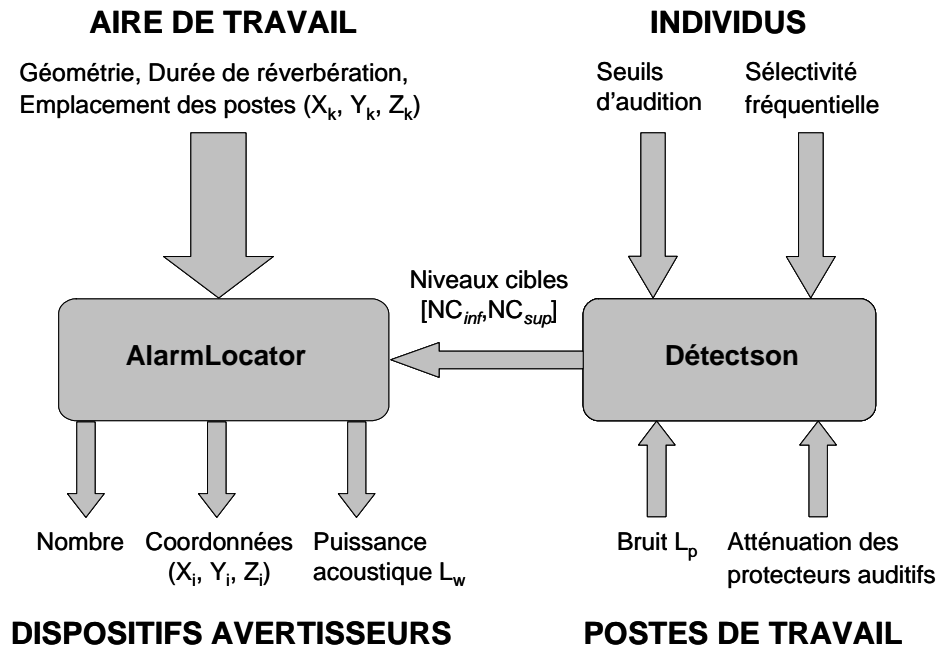


Figure 1. Cadre général menant à l'installation de dispositifs d'alarme en milieu de travail bruyant mettant en œuvre un modèle psychoacoustique de détection sonore (Détectson) et un modèle de propagation sonore dans les locaux industriels (AlarmLocator).

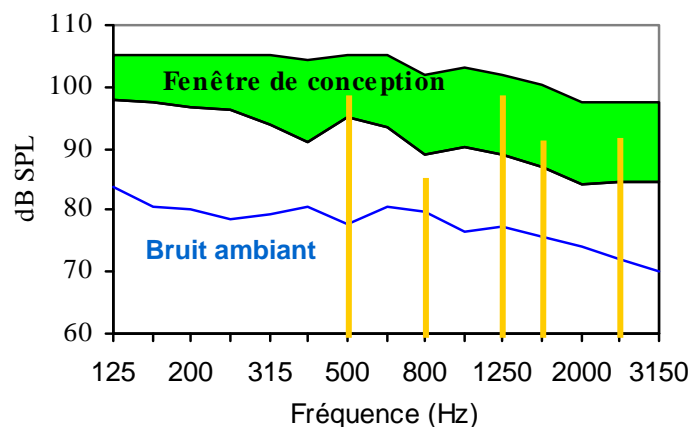


Figure 2. Exemple d'une fenêtre de conception générée par Détectson. Les composantes fréquentielles du signal avertisseur (lignes verticales) doivent se retrouver dans la partie ombragée. Le tracé horizontal au bas de la figure représente les niveaux sonores du bruit au poste de travail en bandes de tiers d'octave.

Tel qu'illustré à la figure 1, le modèle de propagation sonore AlarmLocator [11] est ensuite utilisé pour rechercher des configurations d'avertisseurs sonores pouvant satisfaire les spécifications fournies par Détectson à tous les postes de travail. L'utilisation d'AlarmLocator requiert les paramètres d'entrée suivants:

- (1) les niveaux sonores cibles $[NC_{inf}, NC_{sup}]$ du signal avertisseur optimal pour chaque poste de travail tels que déterminés par Détectson ;
- (2) les caractéristiques de l'aire de travail (dimensions du local industriel, durée de réverbération acoustique, emplacement des différents postes de travail).

AlarmLocator adopte une méthode hybride de calcul prévisionnel du niveau sonore généré par les dispositifs avertisseurs comprenant une méthode des images pour les trois premiers ordres de réflexion acoustique sur les surfaces internes du local et une adaptation de la théorie statistique d'acoustique des salles pour les ordres supérieurs [11]. Au départ, AlarmLocator détermine s'il existe des solutions possibles (en termes de puissance acoustique L_w et d'emplacement $[X_i, Y_i, Z_i]$ sur les murs) utilisant un seul dispositif avertisseur satisfaisant les contraintes $[NC_{inf}, NC_{sup}]$ imposées par Détectson à tous les postes de travail et pour toutes les composantes fréquentielles du signal avertisseur. Pour ce faire, une recherche computationnelle est réalisée en déplaçant le dispositif avertisseur sur les murs du local selon une grille prédéfinie dont le pas est réglable par l'utilisateur (généralement 1 m). Si aucune solution n'est trouvée, un deuxième dispositif avertisseur est introduit et une nouvelle recherche est démarrée automatiquement. Le processus se poursuit jusqu'à ce que le nombre minimal de dispositifs avertisseurs produisant des solutions soit déterminé ou jusqu'à ce que le nombre maximal de dispositifs spécifié par l'utilisateur soit atteint. Généralement, trois dispositifs avertisseurs ou moins sont nécessaires.

Suite à cette analyse, AlarmLocator produit une gamme de solutions ou configurations possibles d'avertisseurs sonores dans le local industriel satisfaisant toutes les contraintes du milieu de travail. Ces solutions sont classées selon l'écart absolu moyen entre les niveaux prédits des composantes fréquentielles du signal avertisseur aux différents postes de travail et le niveau cible moyen, soit $(NC_{inf} + NC_{sup})/2$. Une solution idéale pour laquelle toutes les composantes fréquentielles du signal avertisseur tombent exactement dans le milieu des fenêtres de conception correspond à un écart de 0 dB. Généralement, des solutions avec un écart absolu moyen de 3 dB ou moins sont possibles. AlarmLocator permet ainsi d'identifier:

- (1) le nombre minimal de dispositifs d'alarme requis dans le local ;
- (2) les coordonnées des emplacements optimaux des dispositifs avertisseurs dans le local ;
- (3) la puissance acoustique requise pour chaque dispositif avertisseur.

Ensemble, ces trois éléments forment une solution complète pour l'installation de dispositifs avertisseurs facilement utilisables dans le milieu de travail. Le nombre minimal de dispositifs et la puissance sonore optimale sont des paramètres requis à l'achat, alors que l'emplacement optimal des dispositifs avertisseurs sur les murs ou plafonds est indispensable lors de l'installation.

3. SIMULATIONS

3.1 Caractéristiques du milieu de travail

La présente étude porte sur un atelier rectangulaire de 8.77 m par 14.75 m, d'une hauteur de 6.62 m, situé dans un centre de recherche de la région d'Ottawa. La durée de réverbération acoustique dans l'atelier ainsi que le coefficient moyen d'absorption sont indiqués au tableau 1 pour différentes fréquences.

Tableau 1: Durée de réverbération mesurée dans l'atelier et estimation des coefficients moyens d'absorption sonore à différentes fréquences.

Fréquence (Hz)	Durée de réverbération (s)	Coefficient moyen d'absorption
250	0.86	0.28
500	0.91	0.26
1000	0.89	0.27
2000	0.84	0.29
4000	0.75	0.32

Cet atelier a préalablement servi à valider la précision des modèles Détectson et AlarmLocator pour un ensemble de sources sonores disposées sur les murs de l'atelier [14]. Pour Détectson, les résultats ont démontré une erreur moyenne de prédiction des seuils masqués chez des sujets humains de 0.0 dB (écart-type de 1.4 dB) pour neuf conditions de bruit, protection auditive et son avertisseur. De plus, le niveau optimal d'ajustement d'un avertisseur sonore à trois composantes (500, 1000, 2000 Hz) pour un signal clairement audible mais confortable fut de 18.3 dB au dessus du seuil masqué des sujets en moyenne (écart-type de 3.1 dB). Ces données correspondent presque parfaitement au milieu de la fenêtre de conception de Détectson, laquelle se situe de 12 à 25 dB au-delà des seuils masqués. Pour AlarmLocator, les données révèlent une erreur moyenne de 0.1 dB (écart-type de 0.9 dB) entre les niveaux mesurés au sonomètre et les prédictions du niveau des signaux avertisseurs aux différents postes de travail pour un ensemble de 27 conditions expérimentales [14]. Ces résultats terrain démontrent la validité des outils Détectson et AlarmLocator pour l'analyse des besoins en avertisseurs sonores en milieu de travail bruyant.

La figure 3 illustre le plan de l'atelier ainsi que trois postes de travail simulés (P_1 - P_3) qui serviront à illustrer les contraintes d'installation d'avertisseurs sonores, selon les caractéristiques du bruit dans l'atelier, le statut auditif des travailleurs et le port de protecteur. La figure 4 illustre le spectre du bruit présumé aux trois postes de travail. Il s'agit d'un bruit dont le niveau en bande de tiers d'octave est constant jusqu'à 1000 Hz, puis chute à raison de 10 dB par octave [14]. Pour ce type de bruit, un important effet de débordement de masque est possible pour des individus atteints d'une perte auditive aux hautes fréquences. Le niveau sonore global aux trois postes varie de 86 à 96 dBA.

On définit ensuite trois travailleurs ($Indiv_1$, $Indiv_2$, $Indiv_3$) qui ont été exposés au cours de leur carrière aux niveaux sonores prescrits dans l'atelier selon la grille suivante : $Indiv_1$ (homme âgé de 40 ans, 20 ans d'exposition à un niveau de 91 dBA), $Indiv_2$ (homme âgé de 50 ans, 30 ans

d'exposition à un niveau de 91 dBA), Indiv₃ (homme âgé de 55 ans, 35 ans d'exposition à un niveau de 96 dBA). Le tableau 2 indique les seuils d'audition des trois travailleurs selon le 10^e centile de la norme ISO 1999 [12]. En plus d'une élévation des seuils auditifs, la surdité engendre une baisse de sélectivité fréquentielle qui peut se manifester par un élargissement des filtres auditifs des individus atteints. Le tableau 3 indique les largeurs des filtres auditifs des trois individus prédites par Défectson [9] selon les données expérimentales en [8]. Aux hautes fréquences, la perte auditive engendre un élargissement important des filtres auditifs pour le travailleur Indiv₃ et dans une moindre mesure pour le travailleur Indiv₂. Un élargissement des filtres rend plus difficile la perception de signaux dans le bruit.

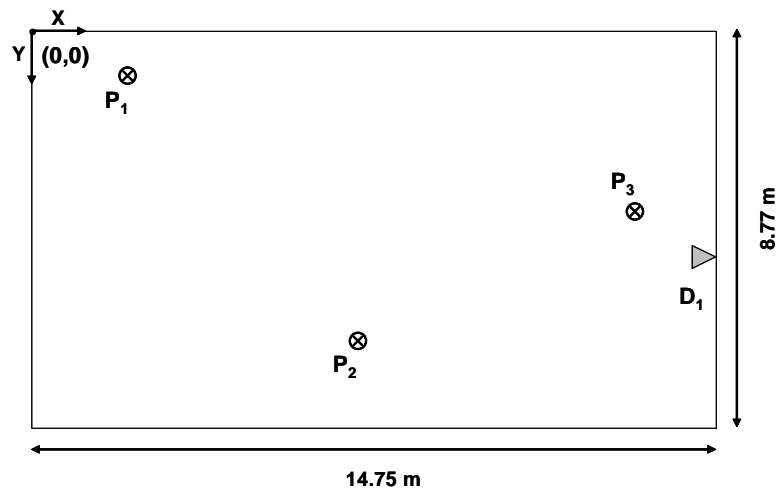


Figure 3. Schéma de l'atelier et emplacement des trois postes de travail (P₁-P₃). Une solution de signaux avertisseurs comprenant un seul dispositif D₁ est aussi indiquée

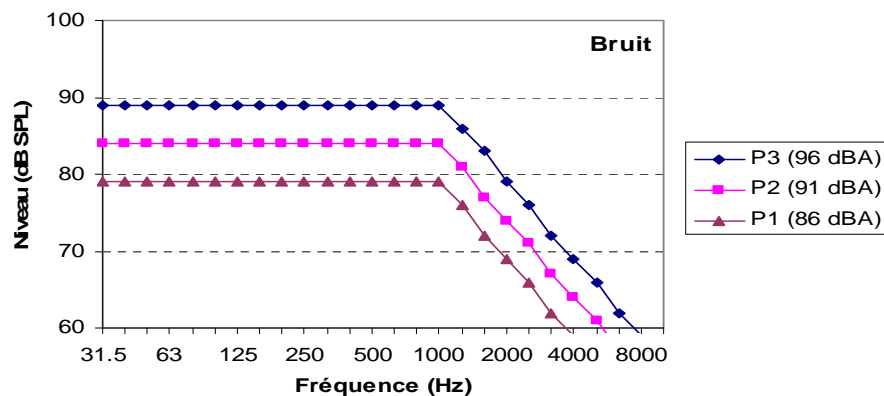


Figure 4. Distribution spectrale du bruit dans l'atelier aux trois postes de travail (P₁-P₃) en bandes de tiers d'octave (dB SPL) et niveau global du bruit (dBA) à chaque poste

Tableau 2: Seuils d'audition de trois travailleurs ayant préalablement été exposés au bruit industriel: Indiv₁ (perte légère), Indiv₂ (perte modérée), Indiv₃ (modérément sévère).

Fréquence (Hz)	Indiv ₁ (dBHL)	Indiv ₂ (dBHL)	Indiv ₃ (dBHL)
	Homme 40 ans 20 ans @ 86 dBA	Homme 50 ans 30 ans @ 91 dBA	Homme 55 ans 35 ans @ 96 dBA
500	11	13	17
1000	11	15	23
2000	17	29	43
3000	25	44	63
4000	31	52	69
6000	31	52	69

Tableau 3: Largeur des filtres auditifs des trois travailleurs (Indiv₁–Indiv₃). Les chiffres entre parenthèses indiquent le facteur d'élargissement des filtres par rapport à un individu avec audition normale.

Fréquence (Hz)	Indiv ₁ (Hz)	Indiv ₂ (Hz)	Indiv ₃ (Hz)
	Homme 40 ans 20 ans @ 86 dBA	Homme 50 ans 30 ans @ 91 dBA	Homme 55 ans 35 ans @ 96 dBA
500	94 (1.0)	94 (1.0)	94 (1.0)
1000	164 (1.0)	164 (1.0)	164 (1.0)
2000	346 (1.0)	456 (1.3)	799 (2.3)
3000	523 (1.1)	1362 (2.8)	2156 (4.1)
4000	1034 (1.5)	2177 (3.1)	3137 (4.5)

3.2 Influence de la perte auditive et du port de protecteur à un poste de travail individuel

L'utilisation de Détectson permet de démontrer comment la fenêtre de conception optimale d'avertisseurs sonores à un poste de travail donné dépend de la perte auditive du travailleur et des caractéristiques des protecteurs auditifs utilisés. La figure 5 illustre les résultats de Détectson pour les trois travailleurs au poste de travail P₁. Pour chaque travailleur, un graphique indique les fenêtres de conception optimales (cibles inférieures et supérieures) selon le port ou non de trois différents protecteurs auditifs (classe A, B et C) décrits dans la norme canadienne CSA Z94.2-02 [2]. L'atténuation minimale par fréquence pour ces trois classes de protecteurs est indiquée au

tableau 4. Ces valeurs minimales sont utilisées pour les différents calculs et prédictions dans cette étude (niveaux d'exposition effectifs avec protection, fenêtres de conception d'avertisseurs). Au poste P₁, le niveau de bruit dans l'atelier est de 86 dBA et l'utilisation des trois protecteurs décrits au tableau 4 résulterait en des niveaux d'exposition effectifs à l'oreille de 83.7 dBA (acceptable) en classe C, 71.2 dBA (acceptable) en classe B et 64.4 dBA (surprotection) en classe A.

Tableau 4: Atténuation minimale pour trois classes de protecteurs selon CSA Z94.2-02

Fréquence (Hz)	Classe A (dB)	Classe B (dB)	Classe C (dB)
125	10	5	0
250	18	12	0
500	26	16	0
1000	31	21	11
2000	33	23	13
3150	33	23	13
4000	31	21	11
6000	33	23	13
8000	33	23	13

À la figure 5, les cibles inférieures et supérieures des fenêtres de conception du travailleur Indiv₁ (perte légère) au poste P₁ demeurent inchangées suite au port de protecteur auditif, quelle que soit la classe utilisée. Pour ce travailleur, le choix précis de la classe de protection semble très peu influencer la conception d'avertisseurs sonores au poste P₁ et une solution d'avertisseurs sonores conçue sans l'utilisation de protection auditive serait aussi adéquate qu'avec port de protecteurs. De plus, la perception des avertisseurs sonores ne sera que très peu affectée par les différentes sources de variabilité dans l'atténuation réelle du protecteur sur le terrain.

Dans le cas du travailleur Indiv₂ (perte modérée), on remarque à la figure 5 que les cibles inférieures et supérieures de la fenêtre de conception sans protection auditive sont identiques à celles du travailleur Indiv₁ jusqu'à 1250 Hz. Aux plus hautes fréquences, la fenêtre de conception est plus élevée chez le travailleur Indiv₂ (par 5 dB à 3150 Hz) à cause de l'effet de l'élargissement des filtres auditifs (tableau 3) sur les seuils masqués dans le bruit. Pour ce travailleur, le port d'un protecteur de classe B ou C semble très peu influencer la fenêtre de conception d'avertisseurs sonores, sauf pour une légère élévation de 2 dB des cibles à 3150 Hz. Par contre, on remarque une importante élévation de la fenêtre de conception de 8-9 dB à 3150 Hz et dans une moindre mesure à 2500 Hz avec le port du protecteur de classe A. À ces deux fréquences, l'effet combiné de la surprotection et des seuils auditifs élevés du travailleur (tableau 2) nécessite l'emploi de niveaux sonores avertisseurs plus élevés que pour les autres conditions d'écoute (sans protection et protecteurs de classe B ou C).

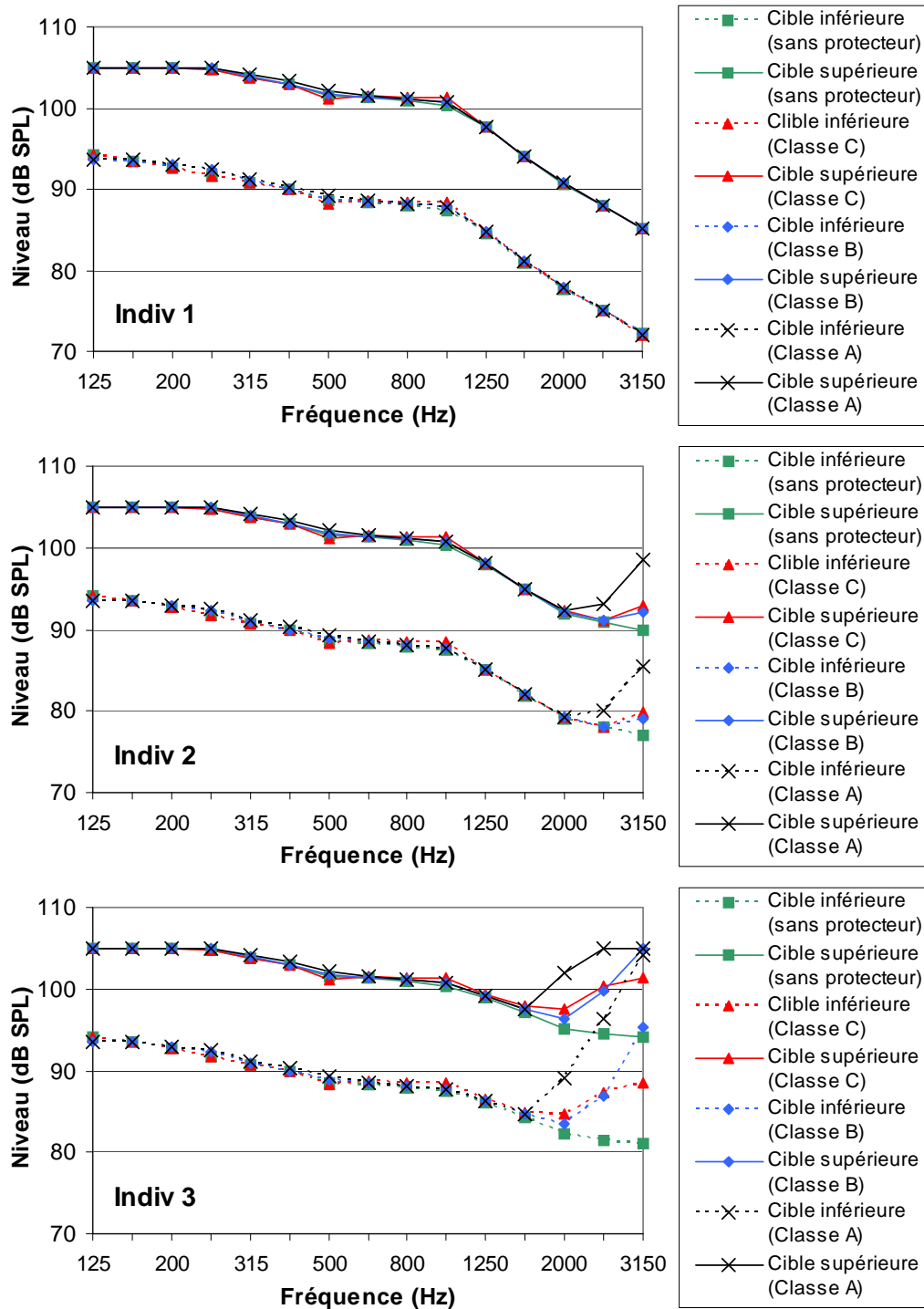


Figure 5. Cibles inférieures NC_{inf} et supérieures NC_{sup} des fenêtres de conception au poste P_1 pour les trois travailleurs Indiv1–3 sans protection auditive et lors du port des trois protecteurs de classe A, B et C.

Dans le cas du travailleur Indiv_3 (perte modérément sévère), on remarque au-delà de 1250 Hz une élévation encore plus importante de la fenêtre de conception sans protection (par 9 dB à 3150 Hz par rapport au travailleur Indiv_1). Ce travailleur possède des filtres auditifs nettement plus larges que le travailleur Indiv_1 (tableau 3), ce qui engendre un important débordement de l'effet masquant du bruit vers les hautes fréquences, étant donné l'allure spectrale du bruit chutant à raison de 10 dB par octave au-delà de 1000 Hz (figure 4). À la figure 5, on remarque aussi que le port de protecteurs auditifs par le travailleur Indiv_3 affecte la fenêtre de conception aux hautes fréquences pour les trois classes de protecteurs. En classe A, la cible inférieure s'élève brusquement à partir de 1600 Hz par cause de surprotection et des seuils auditifs élevés du travailleur (tableau 2). De plus, à 2500 et 3150 Hz, la cible supérieure atteint la limite absolue de 105 dB SPL imposée par Détection. À ces deux fréquences, la largeur de la fenêtre de conception est donc réduite (seulement 8 dB à 2500 Hz et 1 dB à 3150 Hz) par rapport à la largeur désirée de 13 dB. La fenêtre de conception est aussi passablement affectée par le port de protecteurs de classe B et C à partir de 2000 Hz. Pour cet individu, l'utilisation de composantes sonores avertisseurs en hautes fréquences semble donc risquée quelle que soit la classe de protection, la fenêtre de conception devenant très sensible à toute source de variabilité dans l'atténuation réelle du protecteur sur le terrain ou toute erreur d'estimation des seuils auditifs.

3.3 Partage de postes de travail entre individus possédant des statuts auditifs différents

En milieu industriel, les postes de travail sont souvent partagés entre différents travailleurs opérant conjointement ou séquentiellement sur différentes périodes de travail. Dans ce cas, la solution d'avertisseurs sonores à un poste de travail donné doit répondre aux besoins de tous les travailleurs impliqués. Le niveau sonore des signaux avertisseurs doit donc satisfaire les fenêtres de conception particulières de tous les travailleurs. La fenêtre de conception commune est alors composée de la cible inférieure la plus élevée et de la cible supérieure la moins élevée parmi tous les travailleurs, cela fréquence par fréquence, afin d'éviter un inconfort chez les travailleurs dont le statut auditif est bon et d'assurer un niveau suffisant pour ceux qui sont atteints d'une surdité.

À la figure 6, on illustre les fenêtres de conception communes aux trois postes de travail P_1 - P_3 de l'atelier décrit à la section 3.1 en supposant que les trois travailleurs Indiv_1 - Indiv_3 soient susceptibles d'opérer aux trois postes durant une journée ou semaine typique. Aussi, à chaque poste de travail, on supposera que les travailleurs portent un protecteur auditif sélectionné selon la norme CSA Z94.2-02 [2], soit un protecteur de classe C au poste P_1 (86 dBA), de classe B au poste P_2 (91 dBA) et de classe A au poste P_3 (96 dBA). Selon les valeurs minimales d'atténuation au tableau 4, les niveaux d'exposition effectifs à l'oreille sont alors de 83.7 dBA au poste P_1 (acceptable), 76.2 dBA au poste P_2 (optimal) et de 74.4 dBA au poste P_3 (acceptable).

Les fenêtres de conception communes illustrées à la figure 6 pour les différents postes de travail de l'atelier indiquent qu'il n'est pas possible d'envisager des composantes d'avertisseurs sonores au-delà de 2000 Hz à aucun des postes, la largeur des fenêtres de conception devenant trop étroite ou nulle. À partir de 2500 Hz, la cible inférieure des fenêtres de conception pour le travailleur Indiv_3 (perte modérément sévère) est supérieure à la cible supérieure pour le travailleur Indiv_1 (perte légère). Donc, toute composante d'avertisseur dans cette zone de fréquence ne peut à la fois satisfaire les besoins des deux travailleurs.

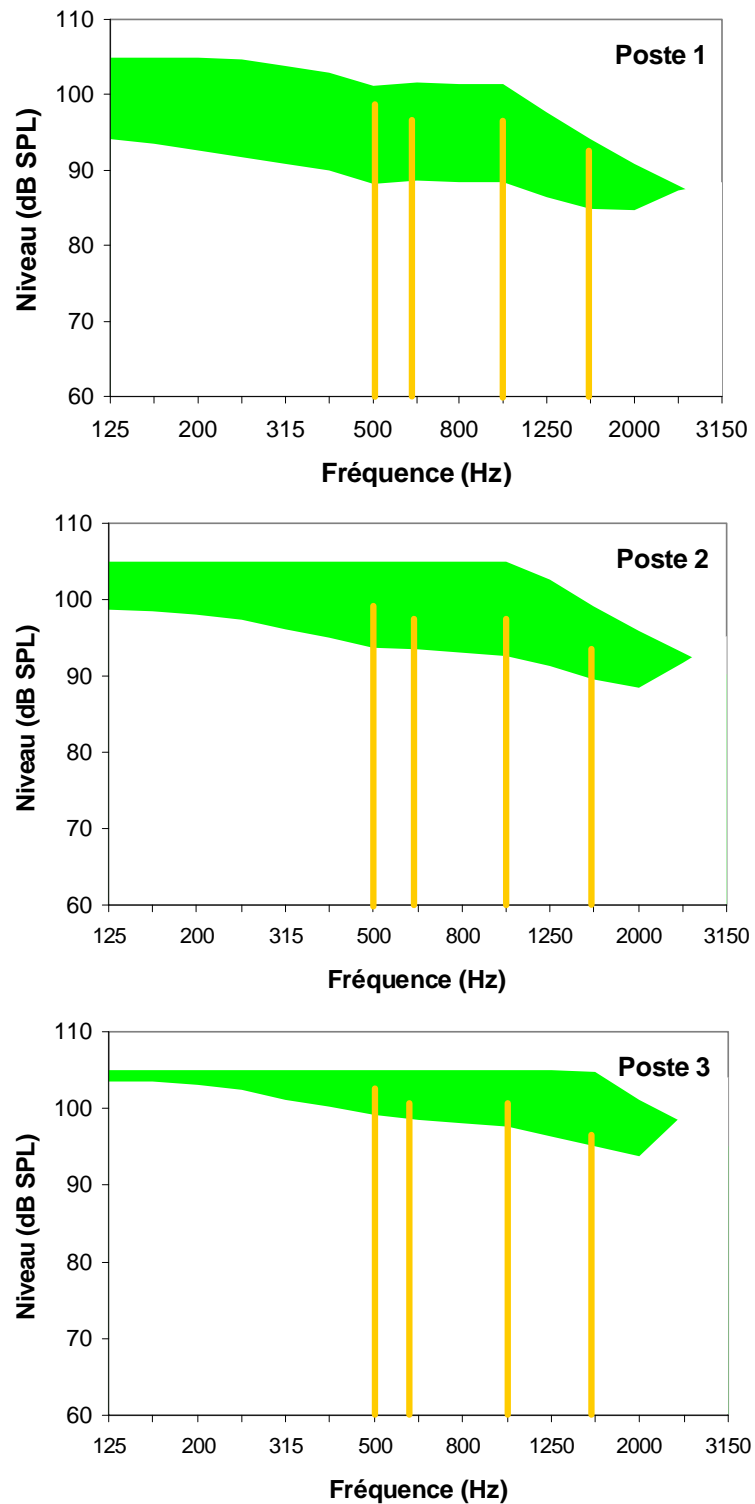


Figure 6. Fenêtres de conception communes aux trois travailleurs $Indiv_1$ – $Indiv_3$ pour chacun des postes de travail. Un protecteur de classe C, B et A est utilisé au poste P_1 à P_3 . Une solution de signaux avertisseurs avec quatre composantes et répondant aux exigences des trois postes de travail de l'atelier est illustrée.

La fenêtre de conception commune la plus large parmi les trois postes de travail est celle correspondant au poste le moins bruyant, P_1 . À ce poste, plusieurs composantes d'avertisseur sonore sont envisageables aux basses fréquences. Aux postes de travail P_2 et P_3 , la cible inférieure des fenêtres de conception est plus élevée qu'au poste P_1 en raison du bruit plus élevé dans l'atelier à ces deux postes. Par contre, la cible supérieure des fenêtres de conception aux postes P_2 et P_3 est limitée par la limite absolue de 105 dB SPL imposée par Détectson pour toute composante d'avertisseur. La fenêtre de conception devient alors très étroite aux basses fréquences, particulièrement au poste P_3 où il devient difficile d'envisager des composantes d'avertisseur en déca de 500 Hz.

3.4 Installation de dispositifs avertisseurs dans l'aire de travail

En pratique, les dispositifs d'avertisseurs sonores sont souvent installés sur les murs ou le plafond du local industriel à une certaine distance des postes de travail ciblés. On doit donc considérer la transmission sonore entre les dispositifs avertisseurs et les différents postes de travail. Le modèle de propagation sonore AlarmLocator recherche les meilleures solutions possibles et permet de s'assurer que les cibles sonores définies par les différentes fenêtres de conception sont satisfaites simultanément à tous les postes de travail avec un nombre adéquat de dispositifs avertisseurs correctement disposés dans l'aire de travail.

Cette étape d'installation d'avertisseurs sonores est illustrée pour l'exemple de l'atelier de la figure 3 en supposant des emplacements bien définis pour les trois postes de travail. On supposera aussi que les cibles d'avertisseurs sonores à atteindre sont les trois fenêtres de conception fournies à la figure 6. En général, on recommande un minimum de quatre composantes fréquentielles pour l'avertisseur sonore [13]. Tel que discuté à la section précédente, il est difficile d'envisager des composantes en déca de 500 Hz et au-delà de 2000 Hz dans cet environnement de travail, selon les caractéristiques du bruit industriel, des protecteurs utilisés et du statut auditif des différents travailleurs. Dans cet exemple, on choisira les quatre composantes suivantes : F_1 (500 Hz), F_2 (600 Hz), F_3 (1000 Hz) et F_4 (1600 Hz).

Le tableau 5 illustre une solution possible au problème d'installation de dispositifs avertisseurs dans l'atelier. La solution consiste en l'utilisation d'un dispositif avertisseur disposé de façon précise dans l'atelier et dont le niveau de puissance acoustique doit être réglé individuellement à chaque fréquence. La figure 3 indique l'emplacement du dispositif D_1 sur les murs de l'atelier. Finalement, les niveaux sonores prédits des quatre composantes du signal avertisseur sont comparés aux fenêtres de conception aux trois postes de travail à la figure 6, confirmant la validité de la solution. L'écart absolu moyen entre les niveaux prédits et le milieu des fenêtres de conception est de 2.6 dB.

Tableau 5: Solution d'installation d'un dispositif avertisseur pour l'atelier émettant un minimum de 4 composantes fréquentielles : F_1 (500 Hz), F_2 (600 Hz), F_3 (1000 Hz) et F_4 (1600 Hz).

Dispositif (i)	X_i (m)	Y_i (m)	Z_i (m)	Niveau de puissance Lw_i (dB)	
D_1	14.75	5.0	3.0	$F_1:116$ $F_3:114$	$F_2:114$ $F_4:110$

4. CONCLUSION

Dans cette étude, un exemple détaillé a permis de mettre en évidence les contraintes d'installation d'avertisseurs sonores et en particulier l'influence entre la perte auditive et du port de protecteurs auditifs sur la perception de signaux avertisseurs. L'exemple consiste en un milieu de travail simulé dont le bruit est prédominant aux basses fréquences et dont les différents travailleurs ont une perte auditive aux hautes fréquences liée à l'âge et à l'exposition préalable au bruit dans ce milieu. Les résultats démontrent que pour un travailleur dont l'audition est relativement peu affectée, le choix de protecteur auditif influence très peu la perception d'avertisseurs sonores à son poste de travail, les solutions étant presque identiques selon le port ou non de différents protecteurs. Par contre, pour un travailleur atteint d'une surdité importante, le choix de protecteurs auditifs affecte de façon importante la solution d'avertisseurs sonores aux hautes fréquences. Dans ce cas, une solution basée sur un protecteur donné n'est plus adéquate si l'on change de protecteur ou si l'atténuation réelle sur le terrain est différente de l'atténuation présumée et il devient donc difficile d'envisager des composantes d'avertisseurs sonores aux hautes fréquences.

La situation se complique davantage lorsque des travailleurs ayant des statuts auditifs différents partagent un poste de travail, même lorsque les protecteurs sont choisis pour éviter la surprotection selon les normes courantes de sélection. Dans ce cas, il ne semble pas envisageable de considérer des composantes du signal avertisseur aux hautes fréquences quel que soit le niveau sonore du bruit industriel. Les résultats des simulations attestent aussi de la difficulté de placer des composantes d'avertisseurs aux très basses fréquences lorsque le bruit en basses fréquences est le moins élevé. Dans ce cas, les niveaux cibles atteignent rapidement un niveau excessif et un niveau plafond de 105 dB SPL est imposé par Défectson afin d'éviter les problèmes de sursaut et de difficultés de communication une fois que les signaux avertisseurs sont activés [15].

Les résultats de la présente étude sont donc consistants avec la norme ISO 7731 [10] recommandant des composantes dominantes du signal avertisseur entre 500 et 2500 Hz et sous 1500 Hz, si des travailleurs ont une perte auditive ou portent des protecteurs auditifs. Il demeure prudent cependant de ne pas surgénéraliser ces conclusions à toutes les situations de bruit en milieu de travail. Différentes conclusions sont possibles pour des cas particuliers de bruit industriel prédominant aux hautes fréquences et de travailleurs atteints de perte auditive aux basses fréquences. L'utilisation d'outils tels que Défectson [9] ou la norme ISO 7731 [10] est nécessaire pour s'assurer de la validité d'une solution donnée.

En général, une solution de signaux avertisseurs pour un milieu de travail est d'autant plus fiable si l'atténuation des protecteurs est connue avec précision. Malheureusement, dans la pratique, il peut y avoir un écart important entre les données du fabricant et l'atténuation réelle sur le terrain [1]. Ceci peut affecter considérablement la fenêtre de conception aux hautes fréquences, particulièrement pour les utilisateurs ayant une surdité. En ce sens, les récents développements d'outils permettant d'estimer l'atténuation réelle des protecteurs auditifs sur le terrain pour différents travailleurs [16, 17] devraient permettre d'obtenir une définition plus réaliste de la fenêtre de conception d'avertisseurs sonores que l'emploi de données statistiques de l'atténuation mesurée en laboratoire. De même, toute variabilité dans l'estimation des niveaux de bruit aux différents postes de travail et des paramètres du statut auditif des travailleurs doit être prise en compte afin d'assurer une solution fiable à l'abri de toute source d'erreur. Il est aussi important de noter que toute modification de

l'environnement acoustique dans l'aire de travail telle que l'ajout ou le retrait de machines, le déplacement de postes de travail ou le contrôle du bruit à la source risque d'affecter les besoins en avertisseurs sonores. Toute solution préalablement établie doit être revalidée suite aux modifications de l'aire de travail afin d'assurer la sécurité.

5. REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient le Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada et la Commission de la sécurité professionnelle et de l'assurance contre les accidents du travail de l'Ontario pour son aide financière. Nous tenons aussi à remercier le Conseil national de recherche du Canada pour l'accès à l'atelier ayant servi d'aire de travail pour les simulations de la présente étude.

6. RÉFÉRENCES

1. Berger E.H., 2000. Hearing protection devices, in E.H. Berger, L.H. Royster, J.D. Royster, D.P. Driscoll and M. Layne (Eds.): The Noise Manual, Fifth Edition, American Industrial Hygiene Association, Fairfax VA.
2. CSA Z94.2-02, 2002. Protecteurs auditifs: Performances, sélection, entretien et utilisation, Association canadienne de normalisation, Toronto, ON.
3. EN 458, 2005. Protecteurs individuels contre le bruit : Recommandations relatives à la sélection, à l'utilisation, aux précautions d'emploi et à l'entretien (Document guide), Norme européenne éditée et diffusée par l'Association Française de Normalisation. ISSN 0335-3931.
4. Berger E.H., 1991. Flat-response, moderate-attenuation, and level-dependent HPDs: How they work, and what they can do for you, 6th Annual Conference of the National Hearing Conservation Ass., San Antonio, TX, Spectrum, 8, Supp.1.
5. Suter A., 2002. Hearing Conservation Manual, Fourth Edition, Council for Accreditation in Occupational Hearing Conservation, Milwaukee USA, 312 pp.
6. Abel S.M., Kunov H., Pichora-Fuller M.K. and Alberti P.W., 1985. Signal detection in industrial noise: Effects of noise exposure history, hearing loss, and the use of ear protection, *Scand. Audiol.*, 14: 161 - 173.
7. Abel S.M., Armstrong N.M. and Giguère C., 1993. Auditory perception with level-dependent hearing protectors: the effects of age and hearing loss, *Scand. Audiol.*, 22(2): 71-85.
8. Laroche C., Josserand B., Tran Quoc H., Héту R. and Glasberg B.R., 1992. Frequency selectivity in workers with noise-induced hearing loss, *Hearing Research*, 64: 61-72.
9. Zheng Y., Giguère C., Laroche C., Sabourin C., Gagné A. and Elyea M., 2007. A psychoacoustic model for specifying the level and spectrum of acoustic warning signals in the workplace, *J. Occup. Environ. Hyg.*, 4: 1-12.
10. ISO 7731, 2003. Danger signals for work places -- Auditory danger signals, International Organization for Standardization, Geneva, ISO 7731.
11. Al Osman R., 2007. Development of "AlarmLocator": A Computerized Model for predicting the optimum number, location, and power level of acoustic warning devices in noisy workplants, Systems Science Master's Thesis, University of Ottawa.
12. ISO 1999, 1989. Acoustique – Détermination de l'exposition au bruit en milieu professionnel et estimation du dommage auditif induit par le bruit, Organisation internationale de normalisation, Genève.

13. Tran Quoc H. et Héту R., 1996. La planification de la signalisation acoustique en milieu industriel: critères de conception des avertisseurs sonores de danger, *Canadian Acoustics*, 24(2): 3-17.
14. Giguère C., Laroche C., Al Osman, R., Zheng Y., 2008. Optimal installation of audible warning systems in the noisy workplace. 9th International Congress on Noise as a Public Health Problem, Foxwoods CT, USA, 197-204.
15. Laroche C., Tran Quoc H., Héту R. and McDuff S., 1991. "Detectsound": A computerized model for predicting the detectability of warning signals in noisy workplaces, *Applied Acoustics*, 32: 193-214.
16. Voix J. and Laville F., 2002. Expandable foam earplug with smart custom fitting capabilities, The 2002 Int. Congress and Exposition on Noise Control Engineering, Dearborn MI, USA, 19-21 August, 9 pp.
17. Soli S.S., Vermiglio A. and Larson V.D., 2005. A System for Assessing the Fit of Hearing Protectors in the Field, 30th Annual Hearing Conservation Conference, Tucson (AZ), Feb 24-26.