

**Conception d'un nouveau
protecteur individuel
anti-bruit « ouvert »**

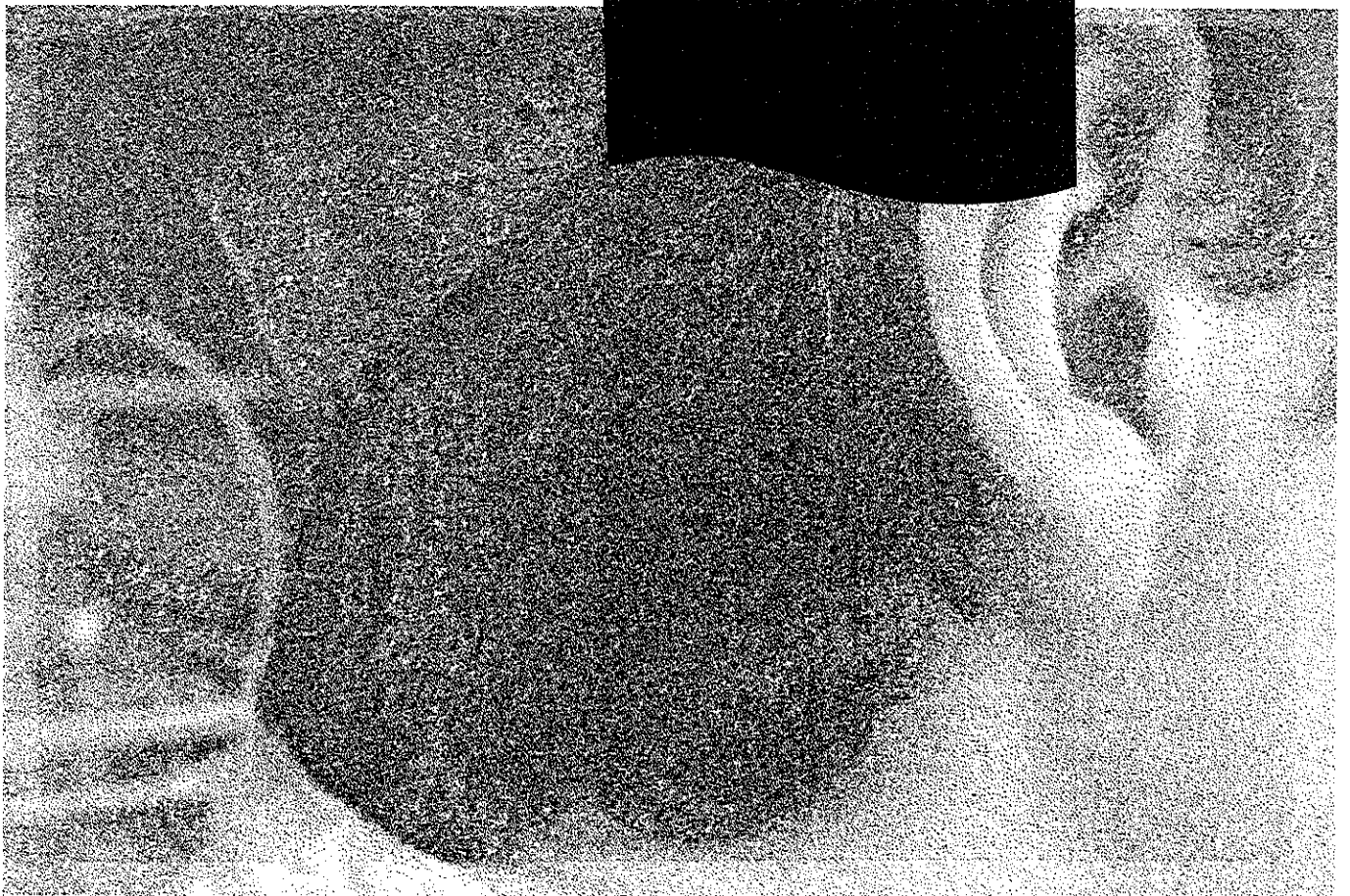
**ÉTUDES ET
RECHERCHES**

André L'Espérance
Bruno Paillard

Mai 1999

R-217

RAPPORT



IRSST
Institut de recherche
en santé et en sécurité
du travail du Québec

La recherche, pour mieux comprendre

L'Institut de recherche en santé et en sécurité du travail du Québec (IRSST) est un organisme de recherche scientifique voué à l'identification et à l'élimination à la source des dangers professionnels, et à la réadaptation des travailleurs qui en sont victimes. Financé par la CSST, l'Institut réalise et finance, par subvention ou contrats, des recherches qui visent à réduire les coûts humains et financiers occasionnés par les accidents de travail et les maladies professionnelles.

Pour tout connaître de l'actualité de la recherche menée ou financée par l'IRSST, abonnez-vous gratuitement au magazine *Prévention au travail*, publié conjointement par la CSST et l'Institut.

Les résultats des travaux de l'Institut sont présentés dans une série de publications, disponibles sur demande à la Direction des communications.

Il est possible de se procurer le catalogue des publications de l'Institut et de s'abonner à *Prévention au travail* en écrivant à l'adresse au bas de cette page.

ATTENTION

Cette version numérique vous est offerte à titre d'information seulement. Bien que tout ait été mis en œuvre pour préserver la qualité des documents lors du transfert numérique, il se peut que certains caractères aient été omis, altérés ou effacés. Les données contenues dans les tableaux et graphiques doivent être vérifiées à l'aide de la version papier avant utilisation.

Dépôt légal
Bibliothèque nationale du Québec

IRSST - Direction des communications
505, boul. de Maisonneuve Ouest
Montréal (Québec)
H3A 3C2
Téléphone : (514) 288-1 551
Télécopieur: (514) 288-7636
Site internet : www.irsst.qc.ca
© Institut de recherche en santé
et en sécurité du travail du Québec,

**Conception d'un nouveau
protecteur individuel
anti-bruit « ouvert »**

André L'Espérance et Bruno Paillard,
Université de Sherbrooke

**ÉTUDES ET
RECHERCHES**

RAPPORT

Sommaire

Un prototype laboratoire de casque actif ouvert a été développé. La particularité de ce casque, basé sur un algorithme de type *feedforward*, est de réduire le bruit de machines spécifiques, tout en laissant passer les signaux utiles (paroles ou signaux avertisseurs de danger). Quatre étapes principales ont été franchies pour réaliser ce prototype : 1) le développement d'une plate-forme de traitement de signal 2) l'implantation d'un algorithme de contrôle 3) la conception d'un casque d'écoute (ensemble haut-parleur-micro) et 4) l'évaluation et l'optimisation du casque prototype en laboratoire.

1. Plate-forme de traitement de signal

Deux cartes DSP TMS320C50 (type point-fixe) ont été utilisées pour la mise en oeuvre, soit une carte de contrôle par oreille. Cette plate-forme a permis l'implantation d'un algorithme d'identification en temps réel et le contrôle d'harmoniques en hautes fréquences.

Il est à noter que la programmation d'un algorithme de contrôle *feedforward* (et de l'algorithme d'identification (voir ci-dessous)) sur un DSP point-fixe était en soi un défi de taille (complexité de la programmation bas niveau et en point-fixe), mais qui a tout de même permis d'atteindre des performances de contrôle en temps réel satisfaisantes. Les coûts des processeurs de calcul point-fixe étant aujourd'hui relativement faibles (près de 10\$), il est permis d'envisager une version commerciale du produit.

2. Développement d'un algorithme d'identification « en présence de bruit »

Le processus de contrôle actif nécessite l'identification de la fonction de transfert entre le bruit envoyé au haut-parleur et le bruit reçu au microphone. Pour réaliser de bonnes identifications malgré la présence de bruit ambiant, une identification de type LMS à commutation du pas d'adaptation a été implantée. Cette méthode est basée sur la connaissance du comportement de la convergence du LMS en fonction du pas d'adaptation et de l'énergie du bruit nuisible. Les résultats obtenus suite à cette implantation se sont avérés tout à fait satisfaisants, le temps nécessaire à l'identification étant de quelques fractions de secondes.

3. Adaptation acoustique de différents casques et différents porteurs

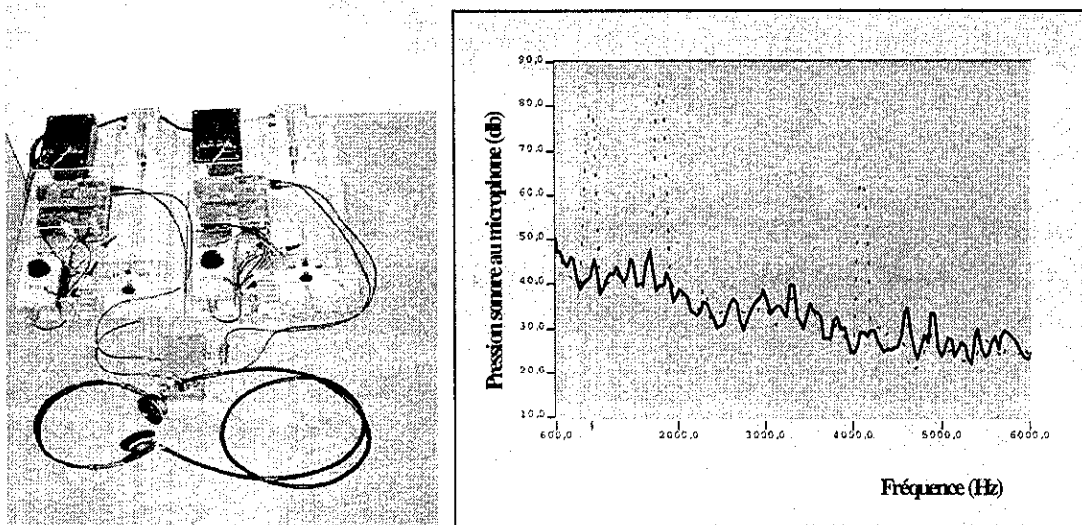
Les fonctions de transfert actuateurs-capteurs peuvent être différentes d'un individu à l'autre, de même que d'un essai à l'autre sur un même individu. Et si elles présentent de fortes irrégularités en fréquence, ces fonctions de transfert peuvent être défavorables à contrôle stable. Une étude expérimentale a été réalisée en vue de concevoir un casque offrant la plus grande stabilité possible des fonctions de transfert haut-parleur-capteur d'erreur pour l'ensemble des individus.

La compilation des résultats a permis de concevoir un casque d'écoute présentant des variations relativement faibles de ces fonctions de transfert haut-parleur-microphone. Ce casque est constitué d'un écouteur de marque *Sennheiser* sur lequel est fixé le capteur d'erreur, un microphone d'erreur de type Electret. Le capteur d'erreur est fixé au centre d'un disque perforé et son axe principal correspond à celui de l'actuateur. Les fonctions de transfert pour ce nouveau casque sont plates et peu variables d'un essai à l'autre jusqu'à 7500 Hz.

4. Évaluation et optimisation des performances du système

De nombreux essais ont été effectués en laboratoire en vue d'évaluer le prototype développé et d'optimiser ses performances. Le prototype conçu permet aujourd'hui d'obtenir des atténuations

de l'ordre de 30 à 40 dB sur des perturbations harmoniques (jusqu'à 3 composantes fréquentielles), tout en laissant passer les signaux utiles. Bien que l'atténuation effective perçue par le porteur soit inférieure à 40 dB (l'atténuation au tympan étant différente de celle obtenue au micro d'erreur), la sensation de confort procurée par une telle atténuation est très impressionnante.



La robustesse du système a également été évaluée. Il est apparu que 3 phénomènes pouvaient entraîner la divergence de l'algorithme : 1) le déplacement du casque sur la tête du porteur 2) la saturation des signaux au microphone et 3) un niveau de la perturbation trop important. L'implantation de tests à différentes étapes du processus de contrôle ont permis de minimiser l'apparition de ces divergences. Certains aspects restent cependant à solutionner, par exemple la divergence (assurée) lorsque le porteur enlève le casque de ses oreilles.

Perspectives

Les résultats obtenus montrent qu'il est possible de réaliser un casque actif de type *feedforward* ouvert permettant de réduire de façon significative le bruit de sources perturbatrices tout en laissant passer le bruit utiles. Cette percée technologique apparaît donc très prometteuse et pourrait permettre à bon nombre de travailleurs de retrouver un confort acoustique sans pour autant être privé de communication avec l'extérieur. Étant donné ces résultats, la prochaine étape serait de réaliser un prototype industriel du casque, en vue d'en faire l'essai en industrie. Les étapes de ce développement seraient :

- Développement des fonctionnalités algorithmiques pour une utilisation simple et sécuritaire .
- Conception d'une configuration capteurs-actuateurs améliorée en vue d'augmenter l'efficacité perçue en haute fréquence.
- Détermination des spécifications et réalisations du lien Radio-Fréquence nécessaire pour la transmission du signal de référence.
- Développement d'un prototype portable (électronique de contrôle et lien Radio-Fréquence).
- Essais et optimisation des performances du casque en milieu industriel.
- Évaluation de l'efficacité du casque selon des standards audiologiques reconnus.

Table des matières

1.	Introduction	1
1.1	Principe de base.....	1
1.2	Caractéristiques et limitations des casques actifs actuels (type feedback).....	2
1.3	Solution novatrice : le casque actif feedforward : efficace, confortable et sécuritaire	2
2.	Rappel des objectifs de recherche	4
3.	Méthodologie.....	4
3.1	Mise en œuvre du système de protecteur actif et d'un contrôleur en temps réel.....	7
3.1.1	Développement du <i>hardware</i> : plate-forme de traitement de signal et casque	7
3.2	Développement d'un algorithme d'identification « en présence de bruit » de la branche de contrôle	9
3.3	Adaptation acoustique de différents casques et différents porteurs.....	13
3.3.1	Problématiques spécifiques	13
3.3.2	Étude expérimentale des FT casques-oreilles	14
3.4	Évaluation et optimisation des performances du système en fonctionnement réel	14
4.	Résultats	16
4.1	Mise en œuvre du système de protecteur actif et d'un contrôleur en temps réel.....	16
4.2	Identification en présence de bruit.....	16
4.3	Résultats des tests comparatifs de plusieurs dispositifs casque/microphones.....	17
4.3.1	Analyse des FT expérimentales.....	17
4.3.2	Modification du casque <i>Sennheiser</i>	19
4.4	Évaluation et optimisation des performances du système en fonctionnement réel	22
4.4.1	Rapidité de convergence	22
4.4.2	Vitesse de poursuite d'un déplacement du porteur en fonction de la complexité du champ de bruit.....	23
4.4.3	Désajustement du contrôleur en présence de signaux « utiles » (alarmes ou conversations).....	24

4.4.4	Atténuations	25
4.5	Étude de la robustesse des algorithmes utilisés	25
5.	Conclusion	26
6.	Perspectives et retombées éventuelles	27
6.1	Développement de fonctionnalités d'automatisation	27
6.2	Détermination des spécifications et réalisation du lien Radio-Fréquence pour le signal de référence	28
6.3	Optimisation de la position du microphone d'erreur et de la réduction de bruit perçue	29
6.4	Conception et réalisation d'un casque prototype pré-production	29
6.5	Validation du fonctionnement en milieu industriel	29
6.6	Évaluation de l'efficacité du casque selon des standards audiologiques reconnus	29
7.	RÉFÉRENCES	30
8.	Composition de l'équipe depuis le début du projet :	32

1. Introduction

1.1 Principe de base

Le contrôle actif [1] utilise le principe de superposition d'ondes pour atténuer le bruit. Ce principe a été énoncé pour la première fois en 1936 par Paul Lueg avec un exemple d'application dans un conduit (Figure 1). Le contrôleur illustré dans cette figure a pour fonction de générer l'anti-onde à partir d'une mesure de référence prise en amont. Le contrôleur a pour tâche de manipuler le signal provenant de la référence de façon à ce que l'anti-bruit soit généré à l'actuateur (le haut-parleur). Lorsque le contrôleur est bien ajusté, une interférence destructive est générée, créant ainsi une zone de silence en aval du haut-parleur.

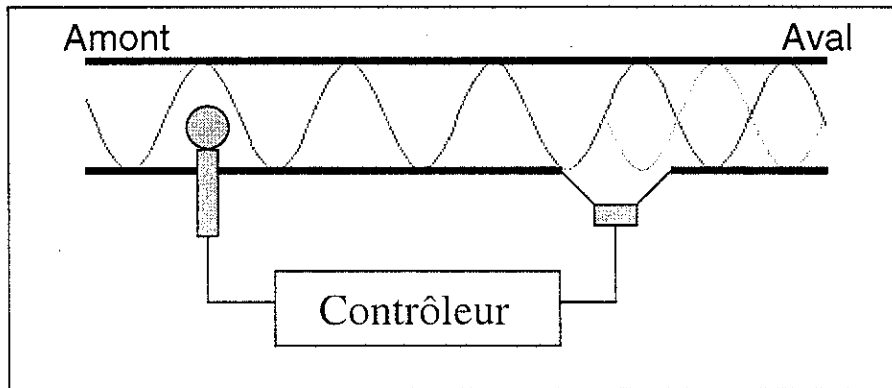


Figure 1 Exemple d'application du contrôle actif dans un conduit

Pour réduire d'environ 20dB un ton pur à un microphone d'erreur, l'onde inverse doit être envoyée avec une précision de l'ordre de $\pm 0.6\text{dB}$ pour l'amplitude et de ± 5 degrés pour la phase. Il est difficile d'imaginer un système avec un contrôleur fixe capable de conserver une telle précision malgré des variations probables de l'onde primaire provenant de la source de bruit. On comprend que la précision et la vitesse d'adaptation nécessaires au contrôleur pour déterminer l'onde de contre-bruit (onde secondaire) deviennent en effet vite très importantes lorsque le bruit de la source primaire fluctue (en fréquence et/ou en amplitude) et/ou lorsque les conditions de propagation sonore sont modifiées.

Ce n'est donc que depuis le début des années 1990 que sont apparues les premières applications, non seulement grâce aux recherches en acoustique et traitement de signal, mais aussi grâce à l'augmentation de la précision des circuits analogiques puis, plus récemment, grâce à l'augmentation de la puissance de calcul des processeurs.

1.2 Caractéristiques et limitations des casques actifs actuels (type feedback)

Le casque actif antibruit de type *feedback* est une des applications intéressantes de contrôle actif actuellement disponibles. Ces casques actifs sont réalisés à l'aide d'une boucle de contrôle analogique (inverseur de phase) qui réduit tout bruit contenu dans la bande passante du système de contrôle. Ces casques peuvent être des coquilles de protection usuelles auxquelles on a ajouté un système de contrôle (ex. casque Techno-First), ou de type ouvert, tels des écouteurs de baladeur (ex. casque Noise Buster, Noise Control Technologies). Ces casques actifs de type *feedback* ont cependant des inconvénients importants :

1. Ils ne permettent pas de faire de discrimination entre les signaux utiles (par exemple, la parole, les alarmes, etc.) et le bruit à atténuer provenant des machines.
2. Dans les casques de type coquille, le poids du système de contrôle s'ajoute aux coquilles, et contribue à augmenter l'inconfort dont se plaignent déjà les travailleurs avec les casques protecteurs ordinaires.
3. Quant aux casques ouverts¹, ils sont limités aux basses fréquences (maximum 1KHz pour le Noise Buster).

Le problème des casques actifs *feedback* n'est donc pas simplement celui de l'efficacité, mais celui de leur fonctionnalité et compatibilité avec les contraintes en milieu de travail. C'est pour palier ces limitations qu'a été envisagé le développement d'un casque actif ouvert de type *feedforward*.

1.3 Solution novatrice : le casque actif *feedforward* : efficace, confortable et sécuritaire

Pour obtenir un casque actif plus sécuritaire et pratique, un casque anti-bruit devrait pouvoir atténuer le bruit indésirable tout en laissant passer les signaux utiles. Le contrôleur doit donc discriminer le bruit à contrôler du signal utile. Ce type de travail ne peut être réalisé que par un contrôleur de type *feedforward*. Les contrôleurs de type *feedforward* disposent en effet d'un signal de référence sur la source de bruit. Ce type de contrôleur permet d'annuler tout signal corrélé avec le signal de référence, donc tout signal provenant de la source de bruit si le signal de référence est associé à cette source de bruit.

La figure 2 donne le schéma de ce type de casque *feedforward*. Près de chacun des haut-parleurs du casque d'écoute, un microphone (microphone d'erreur) permet la mesure de la pression acoustique à l'entrée de chaque canal auditif. Le signal de référence pris à proximité de la source de bruit est également acheminé aux contrôleurs, un pour chaque oreille. Ceux-ci cherchent à minimiser aux microphones la pression acoustique corrélée avec la source de bruit, i.e. provenant de la source de bruit exclusivement.

¹ Les casques de type *ouvert* : Physiquement similaires aux écouteurs audio standards, les casques de type « ouvert » ne s'opposent pas au passage des ondes acoustiques au conduit auditif.

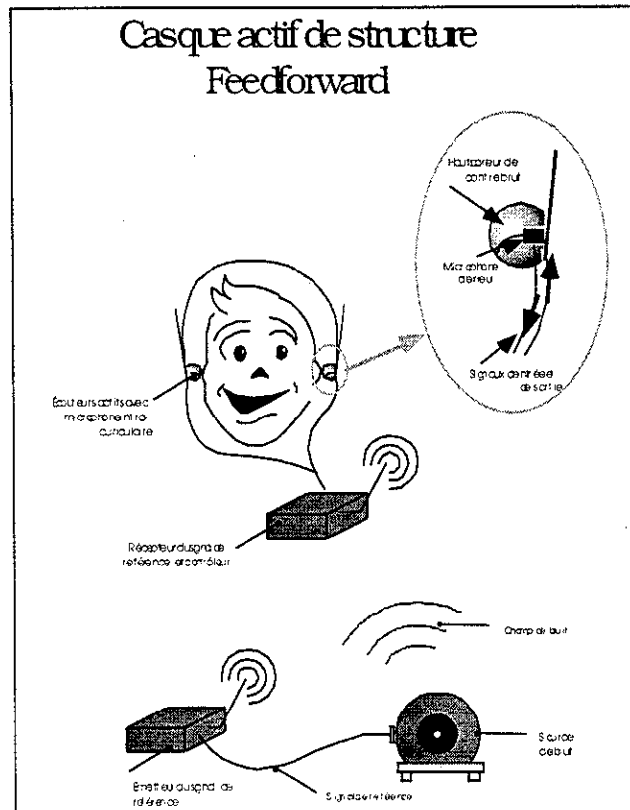


Figure 2

Ce type de fonctionnement a avantage à être implanté sur un casque de type ouvert pour protéger l'utilisateur du bruit provenant d'une ou de plusieurs sources bien identifiées (moteur, compresseur, scie, etc.), tout en permettant l'audition de signaux de paroles ou autres signaux porteurs d'informations.

La difficulté de ce concept est que sa mise en œuvre nécessite un traitement de signal beaucoup plus complexe que l'inverseur de phase analogique utilisé dans les casques actifs de type *feedback*. En 1995, une étude exploratoire (réalisée par B. Paillard et Pierrick Dano à l'aide de simulation) a permis, dans un premier temps, de confirmer la possibilité de traitement numérique en temps réel sur les nouveaux processeurs DSP, puis, dans un deuxième temps, de tracer les grandes lignes de la solution à démontrer, donc la faisabilité de réalisation.

Certaines interrogations et problèmes liés à la mise en œuvre sur un système concret restaient cependant à solutionner, notamment (voir annexe A pour plus de détails) :

1. *La vitesse de poursuite du contrôleur lors du déplacement du porteur*
2. *Le désajustement du contrôleur en réponse à des signaux « utiles ».*
3. *La variabilité dans le temps des fonctions de transfert des branches de contrôle*
4. *La variabilité des fonctions de transfert des branches de contrôle en fonction des utilisateurs.*

Le présent projet de recherche devait permettre d'analyser ces quatre aspects en réalisant un prototype de casque actif ouvert de type *feedforward*.

2. Rappel des objectifs de recherche

Objectif général du projet de recherche

Développer un prototype de casque antibruit de type *feedforward* permettant une discrimination entre le bruit à réduire et les signaux utiles (paroles ou signaux avertisseurs de danger). Entre autres, déterminer les critères et la méthode algorithmique permettant d'assurer une bonne efficacité de fonctionnement en temps réel.

Plus spécifiquement, les objectifs ont été de :

1. Mettre en oeuvre un contrôleur en temps réel sur DSP point-fixe (faible coût et faible consommation) et réaliser un casque prototype ; évaluer et optimiser ses performances de fonctionnement en temps réel.
2. Développer un algorithme d'identification de la branche de contrôle « en présence de bruit ».
3. Comparer l'adaptation acoustique du casque prototype aux oreilles de différents porteurs avec l'adaptation acoustique d'autres ensembles « casque/microphone » commerciaux en vue de déterminer la configuration électroacoustique offrant une adaptation optimum.
4. Étudier et optimiser la robustesse des algorithmes de contrôle et du casque.

3. Méthodologie

La méthodologie utilisée pour réaliser un prototype de casque actif ouvert de type *feedforward* a consisté à :

1. Concevoir un algorithme de contrôle et une plate-forme de traitement de signal adapté à la problématique du casque.
2. Développer un algorithme d'identification « en présence de bruit » de la branche de contrôle.
3. Réaliser une étude paramétrique de l'adaptation acoustique de différentes configurations haut-parleur-micro-oreilles.
4. Évaluer et optimiser les performances du fonctionnement en temps réel.

Avant de décrire les développements spécifiques qui ont été réalisés dans ce projet, il apparaît utile de faire un rappel du fonctionnement d'un algorithme de contrôle de type *feedforward* pour mieux comprendre le fonctionnement du casque développé et les efforts requis en termes de traitement de signal.

Fonctionnement de l'algorithme de contrôle feedforward utilisé

La Figure 3 montre la forme générale d'un système adaptatif. Un filtre est adapté de façon à obtenir un signal permettant de minimiser le signal d'erreur, ce dernier correspondant au signal de bruit moins la sortie du filtre.

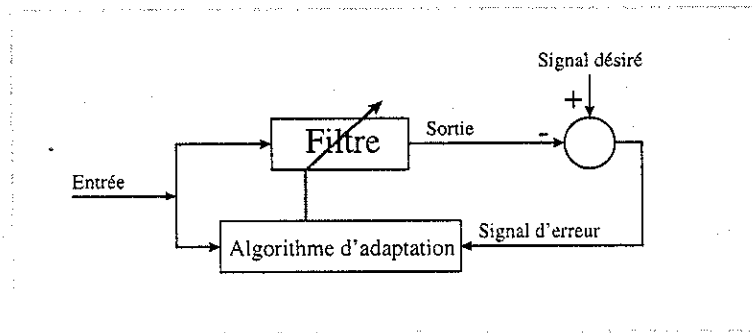


Figure 3 Forme générale d'un système adaptatif

La Figure 4 schématise l'application du système adaptatif au casque actif.

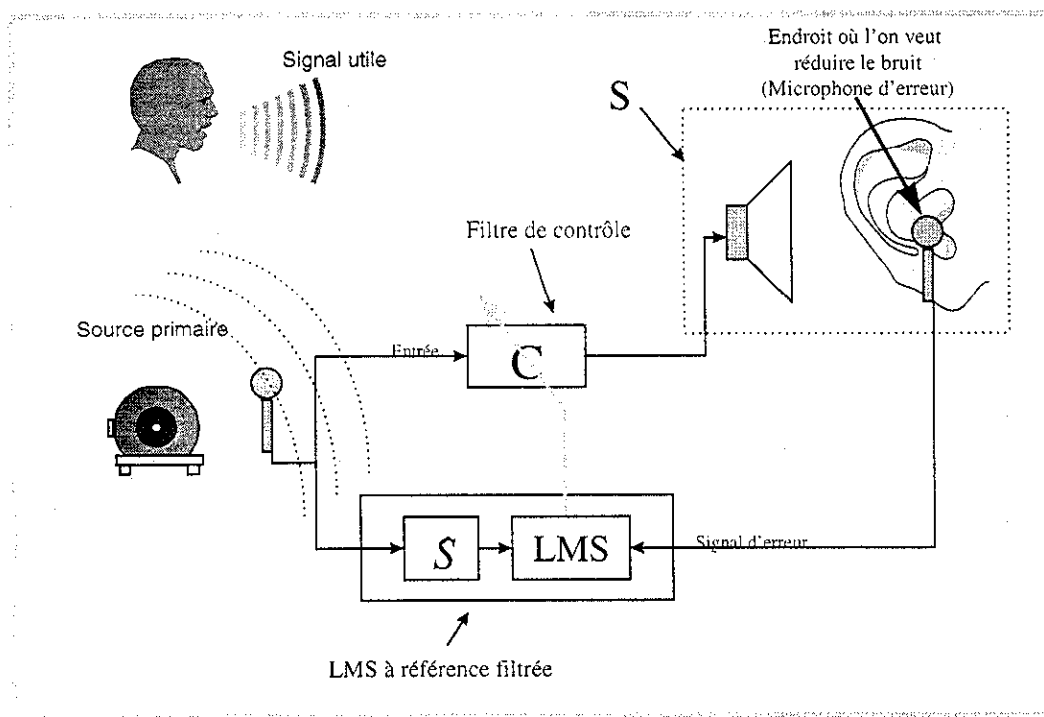


Figure 4 Un canal du casque actif adaptatif feedforward

Un filtre de contrôle est adapté par un algorithme appelé « LMS à référence filtrée » [2,3] de façon à atténuer, au microphone, tout signal qui est corrélé avec la source de bruit. Dans le cas d'un contrôleur de type *feedforward*, l'entrée du filtre de contrôle (référence) est prise à la source de bruit. Cette référence est filtrée par « C » de façon à produire un signal qui, une fois modifié par la fonction de transfert entre le haut-parleur et le microphone (fonction de transfert secondaire S), réduira la contribution de la source primaire au microphone. Le filtre C doit être constamment modifié par un algorithme d'adaptation de façon à « suivre » les variations dans la fonction de transfert principale (fonction de transfert entre la source primaire et le microphone d'erreur). En effet, la relation entre le bruit émis par la source primaire et le bruit reçu par le microphone d'erreur varie au moindre déplacement du porteur du casque. Le filtre C doit « suivre » ces variations tout en tenant compte de la présence de la fonction de transfert secondaire qui elle, est fixe tant et aussi longtemps que l'utilisateur ne déplace pas le casque sur sa tête. L'algorithme LMS à référence filtrée est utilisé fréquemment en contrôle actif adaptatif du bruit [1] car il permet d'adapter les coefficients du filtre de contrôle tout en tenant compte de la fonction de transfert entre le haut-parleur et le microphone (fonction de transfert secondaire S).

Identification de la fonction de transfert secondaire

Dans le cas où la fonction de transfert secondaire (fonction de transfert haut-parleur microphone) est inconnue, mais invariante dans le temps, il est possible de l'identifier dans une phase précédente au contrôle. La Figure 5 illustre une méthode fréquemment utilisée pour l'obtention d'un modèle de la fonction de transfert secondaire S.

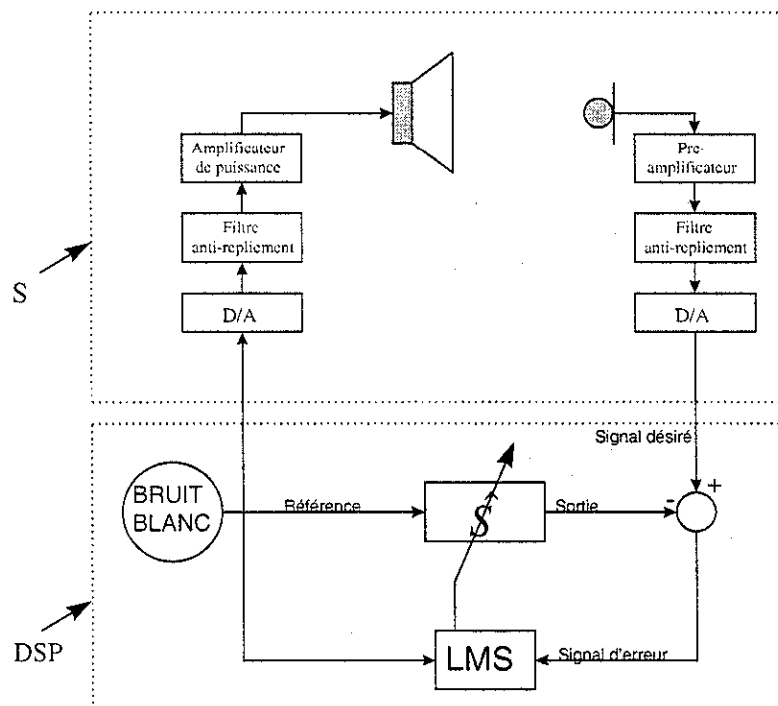


Figure 5 Identification de la fonction de transfert secondaire

Un filtre à réponse impulsionnelle finie (FIR) est utilisé pour modéliser S . Ce filtre est optimisé par un algorithme LMS de façon à ce que sa sortie soit équivalente au signal désiré, provenant du microphone. Un bruit blanc est utilisé comme source d'excitation de façon à obtenir une identification rapide couvrant toutes les fréquences d'intérêt. Une fois qu'une précision suffisante est obtenue sur \hat{S} , le processus est arrêté et le contrôle peut être démarré en utilisant ce modèle pour filtrer la référence.

3.1 *Mise en œuvre du système de protecteur actif et d'un contrôleur en temps réel*

3.1.1 Développement du *hardware* : plate-forme de traitement de signal et casque

L'utilisation d'un seul DSP² pour les deux canaux (oreilles) limitait la puissance de calcul et permettait d'opérer en temps réel à des fréquences d'échantillonnage ne dépassant pas 10 kHz. Notre premier objectif a donc été d'augmenter la puissance de calcul disponible de façon à :

- *Permettre l'identification en temps réel et ainsi diminuer le temps d'identification (augmentation du confort).*
- *Permettre la convergence du contrôleur en temps réel et ainsi accélérer la vitesse de convergence du contrôleur.*
- *Permettre le contrôle d'harmoniques de plus haute fréquence.*
- *Vérifier la possibilité d'utiliser des DSP point-fixe.*

Pour y arriver, le support DSP a été modifié. Au lieu d'un seul DSP point-flottant (TMS320C30) pour les deux canaux, permettant d'exécuter 33.3 MOPS³ (Million d'Opérations Par Seconde), nous utilisons maintenant deux processeurs de type point-fixe (un par canal) permettant ainsi d'atteindre 80 MOPS au total, soit 40 MOPS par DSP. La puissance de calcul a donc plus que doublé sans pour autant augmenter les coûts du système, les processeurs de type point-fixe étant beaucoup moins coûteux que les processeurs à point-flottant pour un nombre comparable de MOPS [3]. La Figure 6 donne le schéma bloc du système développé.

Les processeurs de type point-fixe consomment moins d'énergie, permettant ainsi d'envisager un fonctionnement avec piles. Cependant, les processeurs de type point-fixe ont une dynamique de calcul plus limitée, ce qui ajoute des difficultés de programmation au niveau de la mise en oeuvre des calculs (normalisation des calculs) par rapport aux processeurs point-flottant.

² Un DSP (Digital Signal Processor) est un microprocesseur optimisé pour exécuter des opérations de traitement de signal le plus rapidement possible.

³ En fait, pour les processeurs à point-flottant, on parle plutôt de MFLOPS (Million d'opérations point-flottant par seconde). Pour les besoins de la comparaison avec un processeur point-fixe, nous utilisons plutôt ici le terme MOPS.

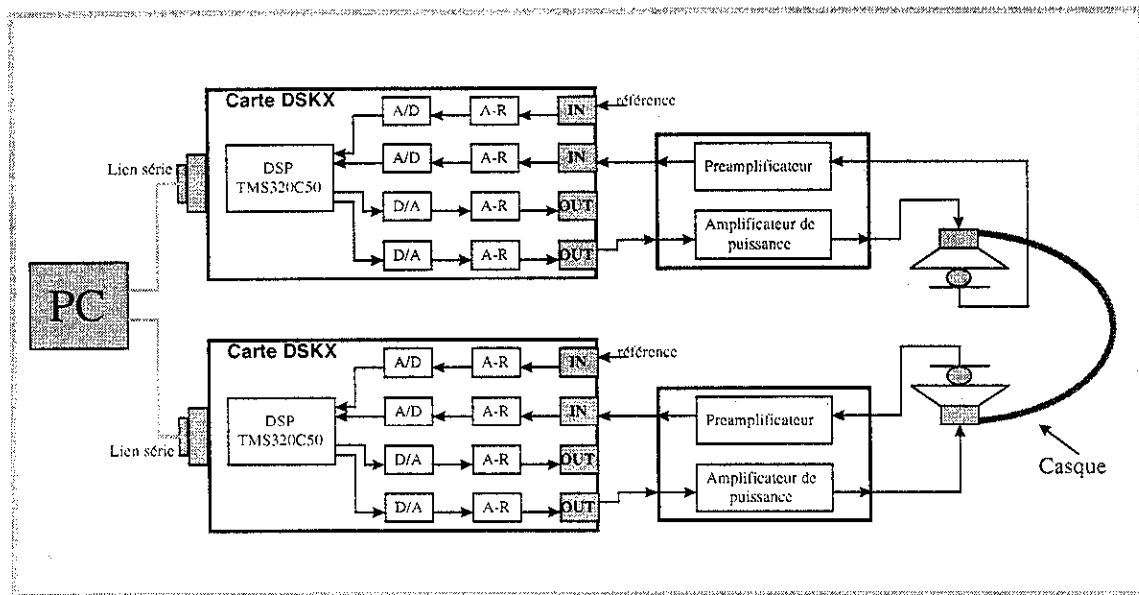


Figure 6 Mise en oeuvre matérielle

Les cartes DSP utilisées pour la mise en oeuvre du prototype ont été développées à l'Université de Sherbrooke (Figure 7). Une carte est utilisée par canal (un canal = une oreille).

En voici les caractéristiques les plus importantes :

- Basée sur un DSP de type point-fixe TMS320C50
- Possède deux AIC (Analog Interface Circuit) avec filtres anti-repliement programmables permettant d'interfacer deux entrées et deux sorties analogiques
- Équipée d'un microcontrôleur 68HC11 (non-illustré) responsable de la gestion des communications avec le port série de l'ordinateur

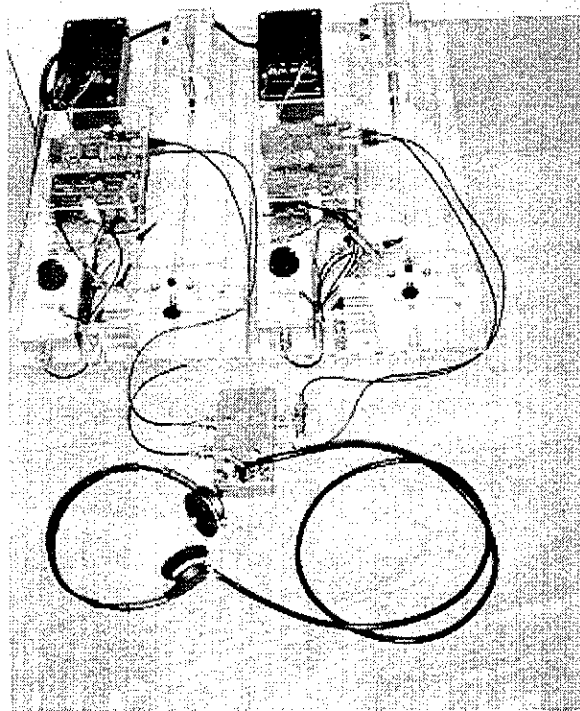


Figure 7 Photo du contrôleur

Pour chaque canal (i.e. chaque oreille), deux entrées analogiques sont utilisées : la première provient de la référence (la source de bruit) et l'autre provient du signal d'erreur préamplifié. Il est en effet nécessaire d'amplifier le signal retourné par le microphone étant donné sa faible amplitude. Une seule sortie par carte est utilisée et sert pour le signal de contrôle. Ce signal doit passer au travers d'un amplificateur de puissance de façon à pouvoir exciter le haut-parleur avec suffisamment de puissance.

Le casque lui-même a été réalisé à partir d'un casque d'écoute de marque Senheiser auquel a été fixé, sur chacun des haut-parleurs, un microphone de type électret. La section 3.3 décrira ce casque.

3.2 *Développement d'un algorithme d'identification « en présence de bruit » de la branche de contrôle*

L'utilisation d'un algorithme « LMS à référence filtrée » pour la phase de contrôle suppose la connaissance de la fonction de transfert entre le haut-parleur et le microphone d'erreur lorsque le casque est porté par un utilisateur. Cette fonction de transfert varie d'un porteur à l'autre et doit donc être identifiée préalablement à la phase de contrôle. La Figure 8 illustre le processus typique d'identification.

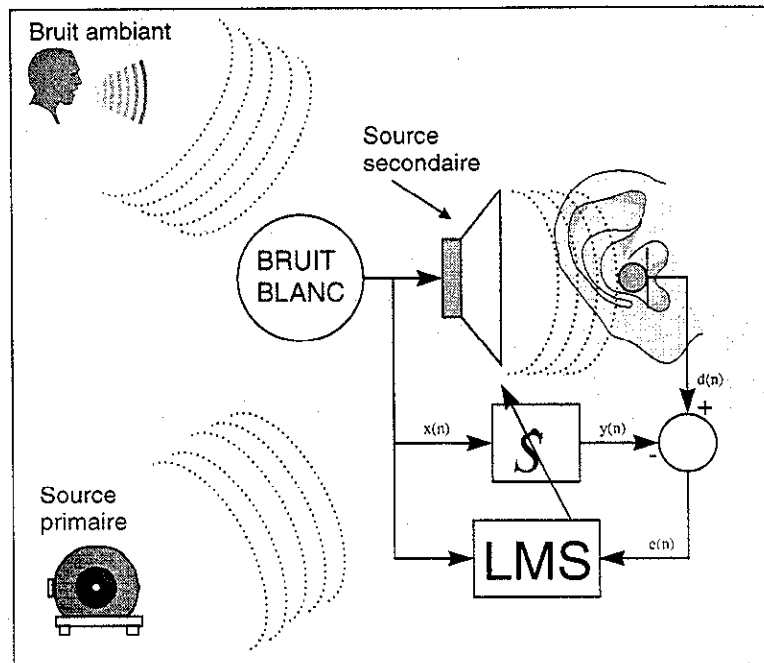


Figure 8 Identification de la fonction de transfert secondaire

Pour réaliser cette identification, un bruit blanc est injecté au haut-parleur et capté par le microphone. L'algorithme LMS a comme fonction de trouver la relation entre le bruit envoyé au H-P et le bruit reçu au microphone. Ce processus est très rapide et simple de mise en oeuvre lorsqu'il n'y a pas d'autres signaux que le bruit blanc d'identification qui sont captés par le microphone. Dans le cas du casque, il y a cependant de bonnes chances que l'utilisateur soit en présence de la source primaire et aussi d'un certain « bruit ambiant » non négligeable. Ce bruit ambiant peut provenir aussi bien d'individus discutant à proximité que d'appareils bruyants autres que la source primaire et situés assez près pour être audibles.

Ainsi, si aucun moyen n'est mis en oeuvre pour tenir compte de ces bruits nuisibles (aussi appelés *bruit de mesure*) pendant l'identification, on peut s'attendre à une précision du filtre identifié moins bonne qu'en l'absence du bruit. Or l'algorithme de contrôle à référence filtrée exige une précision minimale sur le modèle de la branche de contrôle [1,3,8]. Si cette précision n'est pas obtenue lors de l'identification, le contrôleur risque de ne pas pouvoir converger ou bien, tout simplement, de diverger.

Une façon de résoudre le problème serait d'identifier sur une longue période avec un faible pas d'adaptation⁴. Cette solution est toutefois difficilement acceptable ici considérant l'inconfort de

⁴ Le pas d'adaptation (μ) est un paramètre ajustable dans l'équation du LMS qui permet de modifier la vitesse d'adaptation.

l'utilisateur qui entend un bruit blanc de longue durée pendant l'identification, et aussi l'inconvénient inhérent à cette méthode, soit la période d'attente avant le contrôle effectif.

La solution développée pour contourner ce problème a donc été basée sur le fait que le bruit de mesure est composé d'une partie corrélée avec la source primaire. En effet, comme nous l'avons spécifié un peu plus tôt, le bruit de mesure peut être divisé en 2 catégories :

1. le bruit provenant de la source primaire
2. le bruit ambiant

Le bruit ambiant est totalement inconnu au système. Il n'est pas corrélé avec la source primaire et provient de sources sur lesquelles le système n'a pas de capteur. Cependant, le bruit provenant de la source primaire est connu étant donné la présence d'un capteur de référence imposée par la configuration *feedforward* du contrôleur utilisé. Il est donc possible d'identifier la relation entre le signal retourné par le capteur de référence et le signal reçu par le microphone d'erreur. Cette relation est aussi appelée fonction de transfert de la branche principale. La Figure 9 illustre le processus d'identification de la fonction de transfert de la branche principale (P).

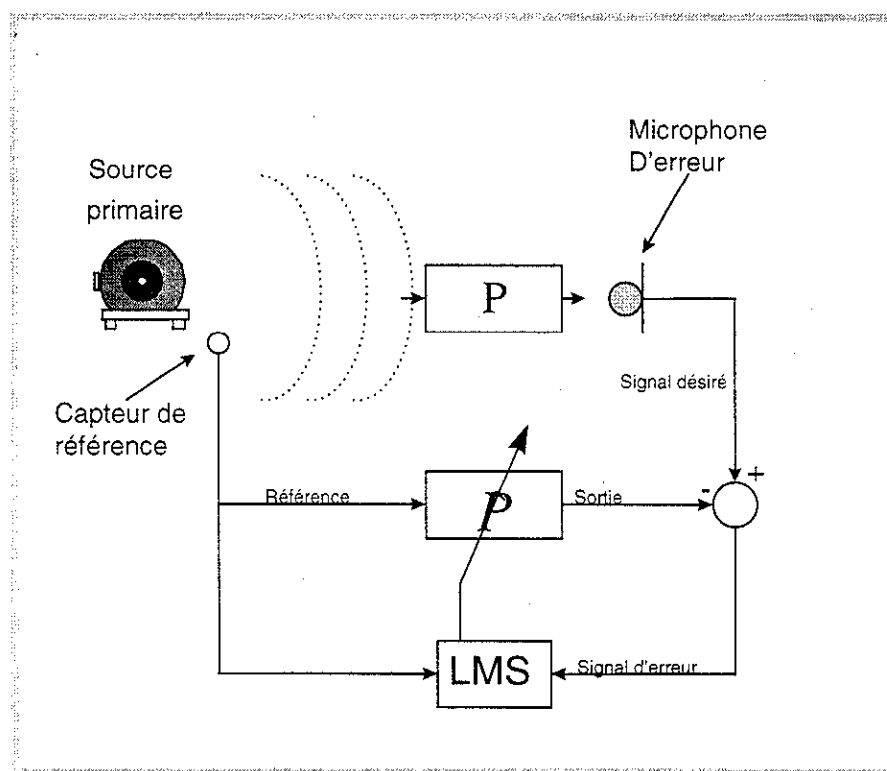


Figure 9 Identification de la fonction de transfert de la branche principale

Une fois cette relation (fonction de transfert P) identifiée, l'effet de la perturbation au microphone peut-être soustraite pendant l'identification de la fonction de transfert secondaire, laissant comme

bruit nuisible uniquement le bruit ambiant (Figure 10). Cette dernière opération est appelée « nettoyage » du signal au microphone, car elle permet, pendant l'identification, de soustraire du microphone la partie corrélée avec la source primaire. La partie restante du bruit de mesure au microphone, le bruit ambiant, ne peut être soustraite étant donné qu'elle n'est pas corrélée avec la source primaire. Il faut donc utiliser une technique qui en tient compte pendant l'identification.

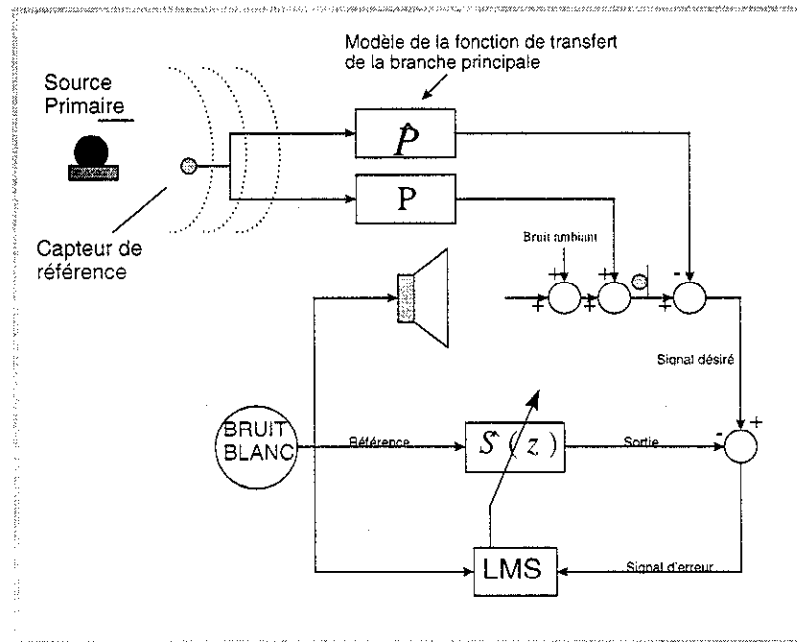


Figure 10 Nettoyage du signal provenant du microphone pendant l'identification de la fonction de transfert secondaire

Pour bien identifier malgré la présence du bruit ambiant, nous avons opté pour une approche de type « LMS à commutation du pas d'adaptation ». Cette méthode se base sur la connaissance du comportement de la convergence du LMS en fonction du pas d'adaptation et de l'énergie du bruit nuisible. Elle consiste à modifier le pas d'adaptation de l'algorithme LMS en cours d'identification en suivant une règle optimale dictée par la théorie de l'information. Bien qu'optimale, un problème persiste; plus le bruit ambiant est important, plus l'identification est longue. Grossièrement, un bruit ambiant dont l'intensité est 2 fois supérieure nécessite une identification d'une durée 2 fois plus longue. Aussi, bien que théoriquement il soit possible d'obtenir une identification suffisamment précise peu importe le niveau du bruit ambiant, ce n'est pas le cas en pratique étant donné les limites du DSP en termes de précision de calcul. Ainsi, dans certaines conditions extrêmes, l'identification ne pourra se faire adéquatement. Par exemple, si le bruit ambiant est de très forte intensité, il y a des chances qu'il soit impossible d'obtenir un modèle adéquat de la fonction de transfert secondaire. Il faut noter que l'expression « de très forte intensité » est relative à la distribution fréquentielle du bruit ambiant.

En fait, plus le bruit ambiant est concentré en fréquence, plus il aura un impact négatif sur l'identification⁵. Ainsi, à intensité égale, un bruit large bande est moins dommageable qu'un bruit à bande étroite, son effet étant dissipé sur une plage fréquentielle plus importante lors de l'identification.

Idéalement, la durée de l'identification serait donc fixée en fonction de l'énergie du bruit ambiant et de son contenu spectral. Dans le cas où l'analyse du contenu spectral du bruit ambiant permettrait d'éviter d'identifier pendant plusieurs secondes inutilement, il vaudrait la peine d'instaurer une analyse spectrale (complexe à mettre en œuvre sur un DSP point-fixe). Dans notre cas, comme nous le verrons dans la section « résultats », la durée de l'identification varie entre quelques millisecondes et une seconde et demie. En première approximation, nous nous contentons donc de fixer la durée de l'identification en fonction uniquement de l'énergie du bruit ambiant.

3.3 *Adaptation acoustique de différents casques et différents porteurs*

3.3.1 **Problématiques spécifiques**

Tel que décrit précédemment, la performance qu'aura un casque actif adaptatif est intimement liée à la précision et à la stabilité des fonctions de transfert (FT) Haut-parleur-microphone (HP-microphone) lorsque le casque est positionné sur les oreilles du sujet. Or la réponse de ces fonctions de transfert dépend à la fois de l'oreille du porteur, des caractéristiques électroacoustiques du casque (efficacité acoustique du haut-parleur, sensibilité du microphone, positions relatives de ces éléments l'un par rapport à l'autre), mais aussi de la position du casque sur l'oreille, et des caractéristiques spécifiques de l'oreille du porteur.

L'objectif de cette partie du programme de recherche a donc été d'identifier un casque où les paramètres électroacoustiques apportaient les plus faibles variations possibles des fonctions de transfert HP-microphone.

Les fonctions de transfert HP-microphone d'un casque positionné sur une oreille sont très variables et complexes, à cause de la réponse acoustique des éléments électroacoustiques du casque lui-même (HP, microphone, position du HP par rapport au microphone), mais également à cause de la cavité qui se forme entre le casque et l'oreille. Cette cavité sera plus ou moins fermée suivant la forme et la position du casque, elle sera plus ou moins importante selon la grosseur du canal auditif d'un individu, ses formes seront complexes et les caractéristiques acoustiques des parois (intérieur de l'oreille) plus ou moins bien définies.

⁵ Dans le cas où le bruit ambiant est concentré dans une zone de fréquence différente de la zone occupée par la source primaire, l'erreur obtenue sur le modèle de S n'aura pas d'impact sur la qualité du contrôle, le modèle étant erroné uniquement pour les fréquences occupées par le bruit ambiant.

La modélisation du système casque-oreille étant donc extrêmement complexe et hasardeuse, il a été choisi de réaliser un plan d'expérience, basé sur la mesure de fonction de transfert HP-microphones de différents types de casques sur plusieurs individus.

3.3.2 Étude expérimentale des FT casques-oreilles

Trois types de casque ont été analysés, soit :

- 1. le casque anti-bruit de type feedback ouvert de NCT inc, le « Noise Buster »; pour ces casques, le haut-parleur est posé à plat sur le pavillon;*
- 2. le casque standard de baladeur (marque Sennheiser), sur lequel un microphone d'erreur est installé;*
- 3. le casque de baladeur intra-auriculaire (marque Sony) dont le haut-parleur doit être légèrement inséré dans le conduit auditif.*

Les fonctions de transfert de ces trois casques ont été mesurées à 3 reprises sur chaque oreille sur environ 20 sujets de façon à pouvoir déterminer non seulement la variabilité des FT d'un casque à l'autre et d'un individu à l'autre, mais également la variabilité des résultats pour un même individu suivant la position du casque. Au total, près de 360 FT ont été réalisées et analysées.

La détermination des fonctions de transfert proprement dites est réalisée en déterminant le rapport du signal mesuré au microphone d'erreur sur le signal envoyé au haut-parleur de contrôle. Le contenu spectral du bruit blanc généré pour cette identification va de 50 à 16 KHz.

Il est à noter que cette étude des fonctions de transfert a été réalisée en portant attention aux formes des oreilles (principalement le conduit auditif), au positionnement des casques montage et à d'autres facteurs pouvant entraîner des variations dans les résultats.

Les résultats de ces tests sont présentés à la section 4.

3.4 Évaluation et optimisation des performances du système en fonctionnement réel

Pour assurer une bonne performance du système de contrôle, trois aspects reliés au port du casque par un utilisateur en situation réelle ont été analysés :

- 1- Rapidité de convergence
- 2- Vitesse de poursuite d'un déplacement du porteur en fonction de la complexité du champ de bruit, et donc de la bande passante contrôlée.
- 3- Désajustement du contrôleur en présence de signaux « utiles » (alarmes ou conversations)

Les trois points sont interdépendants, et sont tous fonction du pas d'adaptation. Plus le pas d'adaptation est élevé (mais en deçà du pas d'adaptation de divergence), plus la convergence est rapide, et plus le contrôleur est apte à suivre les déplacements du porteur. Cependant, plus la

rapidité de convergence est élevée, plus le contrôleur est sensible aux signaux utiles. Une trop grande sensibilité aux signaux utiles peut être désagréable pour l'utilisateur et même causer une divergence. Un compromis entre rapidité de convergence et sensibilité aux signaux utiles a dû être trouvé. Différentes valeurs de pas d'adaptation ont été essayées afin de déterminer ce compromis.

Pour analyser ces effets, des essais de contrôle sur un cobaye ont été effectués en faisant varier les paramètres facilement quantifiables tels que le pas d'adaptation, mais aussi d'autres plus arbitraires tels que les déplacements du porteur dans le champ sonore. Ces essais ont été réalisés en laboratoire.

Voici la méthodologie utilisée pour analyser la robustesse des algorithmes :

- 1- Le déplacement du casque de sa position initiale sur la tête de l'utilisateur (celle pendant la phase d'identification) modifie la fonction de transfert secondaire réelle, avec comme conséquence que le modèle identifié préalablement peut devenir suffisamment invalide pour que l'algorithme LMS à référence filtrée diverge. Le seul moyen connu pour résoudre ce problème est l'identification en fonctionnement (on-line), qui consiste à identifier la fonction de transfert secondaire sans arrêt, de façon à suivre les modifications possibles de celle-ci. Cette solution a été essayée dans une phase précédente et il a été démontré [4] qu'elle s'applique mal à un cas de casque anti-bruit.
- 2- La saturation des signaux au microphone crée des non-linéarités et peut faire diverger le contrôleur. Par exemple, un bruit d'impact peut créer une pression très forte au microphone, faisant saturer ce dernier. Une solution possible à ce problème est d'interrompre l'adaptation des coefficients lorsque les signaux provenant du microphone sont saturés.
- 3- Une perturbation d'amplitude très élevée exigera aussi un signal de contrôle d'amplitude très élevé. Les écouteurs, à partir d'un certain niveau,aturent et génèrent des non-linéarités qui risquent de faire diverger le contrôleur. Cette situation peut être corrigée uniquement en choisissant un type d'écouteurs capables de générer des niveaux d'anti-bruit à l'oreille au moins égaux aux niveaux maxima générés par la source primaire.

Outre les trois aspects précédents initialement prévus dans le projet de recherche, il est apparu utile, au cours des travaux, d'analyser un quatrième aspect de la mise en œuvre d'un casque actif ouvert, soit la robustesse des algorithmes.

La deuxième étape consistait à implanter un processus permettant d'arrêter le contrôleur en cas de divergence, et ce, suffisamment rapidement pour éviter l'effet désagréable d'un bruit fort à l'oreille de l'utilisateur. Ce processus doit, en plus de détecter une condition de divergence, arrêter le contrôleur, identifier à nouveau la fonction de transfert secondaire et redémarrer le contrôleur. Le défi était de détecter la situation de divergence. La méthode choisie consiste à suivre constamment le cheminement des coefficients du filtre de contrôle. Lorsqu'un coefficient atteint un niveau de saturation, c'est un bon indicateur que le contrôleur a divergé. Il faut alors arrêter immédiatement le contrôle.

4. Résultats

4.1 Mise en œuvre du système de protecteur actif et d'un contrôleur en temps réel

L'utilisation de 2 DSP au lieu d'un seul nous a permis d'augmenter suffisamment la puissance de calcul pour arriver à opérer en temps réel à une fréquence d'échantillonnage égale à 20 kHz. Cette augmentation de la fréquence d'échantillonnage permet :

- d'identifier en temps réel et ainsi d'arriver à des durées d'identification plus que raisonnables;
- au contrôleur de converger en temps réel et ainsi d'atteindre des vitesses de convergence impressionnantes;
- de contrôler des harmoniques dont la fréquence peut monter jusqu'à 8kHz. En fait, nous pouvons maintenant contrôler des composantes dont la longueur d'onde est trop petite pour qu'un effet d'atténuation subjectif soit ressenti. Pour pouvoir profiter à plein des capacités du contrôleur, il faudra modifier le casque de façon à ce qu'un effet subjectif soit ressenti pour des fréquences dépassant 4000 Hz.

Finalement, nous avons pu vérifier qu'il est possible de programmer les algorithmes de contrôle sur DSP point-fixe et d'obtenir de très bonnes performances. Ce détail important permet d'envisager une version moins coûteuse du système, c'est-à-dire portable et fonctionnant avec des batteries.

4.2 Identification en présence de bruit

La mise en œuvre du « nettoyage » du signal au microphone ainsi que du LMS à commutation du pas d'adaptation ont permis d'obtenir une phase d'identification dont la durée varie entre 50ms et 1,5 seconde environ, tout dépendant de l'énergie du bruit ambiant.

La partie « nettoyage » permet de diminuer la contribution de la source primaire au microphone d'environ 40 dB. Ainsi, le bruit de mesure, après le processus de nettoyage, est surtout constitué du bruit ambiant (non corrélé avec la perturbation primaire). C'est donc l'énergie de ce bruit qui est mesurée et qui détermine la durée de l'identification.

Le tableau suivant nous donne un ordre de grandeur du temps d'identification nécessaire pour 3 cas différents de bruit ambiant.

Type de bruit	Intensité (dBA)	Durée (secondes)
Blanc, limité entre 1500 et 2500Hz	82	1,5
	68	0,1

Blanc, limité entre 1000 et 8000Hz	92	1,5
	72	0,1
Blanc, non-limité	95	1,5
	75	0,1

Tableau 1 : temps d'identification nécessaire pour 3 cas différents de bruit ambiant

Ce tableau nous montre aussi les niveaux maxima permettant une identification valable, car les identifications dont la durée est de 1,5 secondes correspondent à la limite en temps d'identification. Ainsi, pour un bruit blanc limité entre 1500 et 2500 Hz, l'intensité maximale permise est de 82 dBA. Dans le cas où le bruit blanc est limité entre 1000 et 8000 Hz, l'intensité maximale permise est de 92 dBA. Si le bruit est blanc et n'est pas limité en fréquence, i.e. qu'il est aussi large que la bande audible, l'intensité maximale permise atteint alors les 95 dBA.

Nous constatons donc que l'identification peut se faire adéquatement avec des niveaux de bruit ambiant très importants. Il est peu probable qu'un utilisateur du casque actif soit exposé à de tels niveaux de signaux, non-contrôlables par le casque lui-même.

4.3 Résultats des tests comparatifs de plusieurs dispositifs casque/microphones

4.3.1 Analyse des FT expérimentales

Les figures suivantes présentent un ensemble de fonctions de transfert obtenues pour les trois casques considérés et un ensemble d'auditeurs.

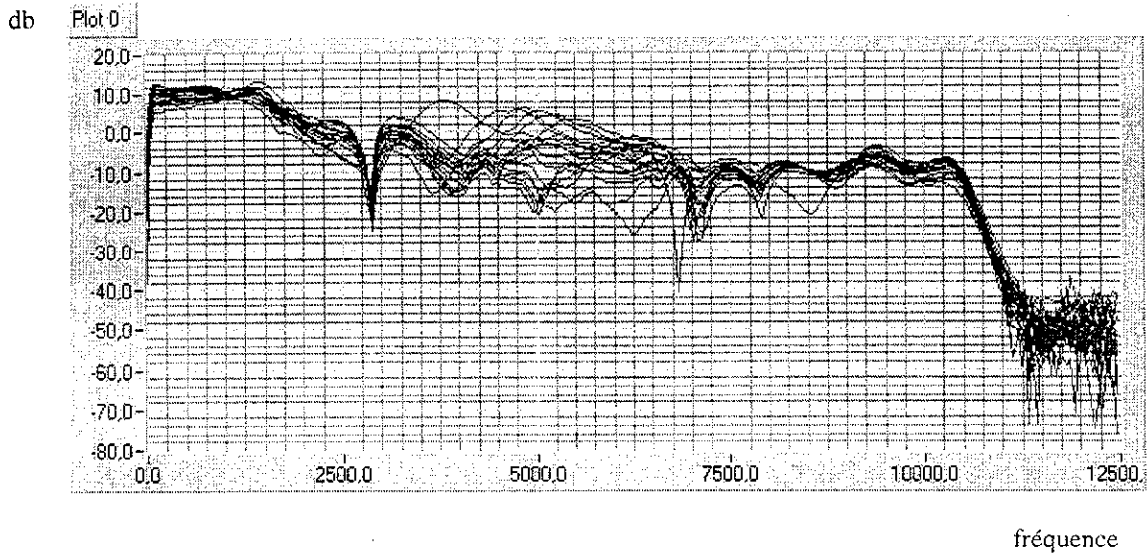


Figure 11 Fonction de transfert du casque de contrôle actif de NCT inc. (oreille droite) (casque de type *feedback* analogique).

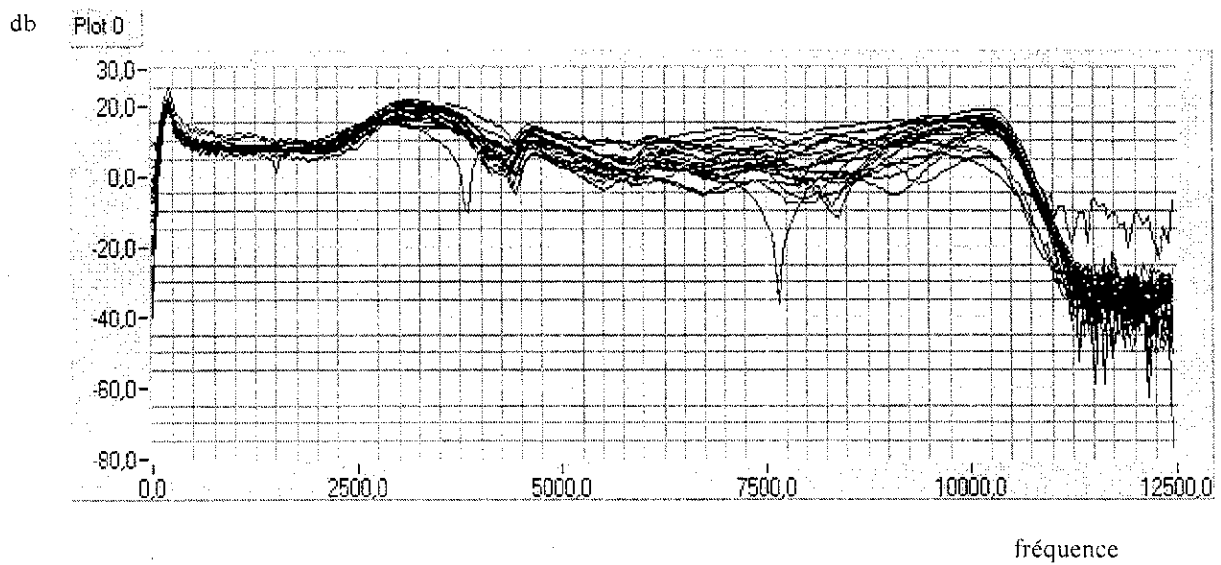


Figure 12 Fonction de transfert d'un casque pour baladeur standard (marque *Sennheiser*) modifié par l'ajout d'un microphones (oreille droite).

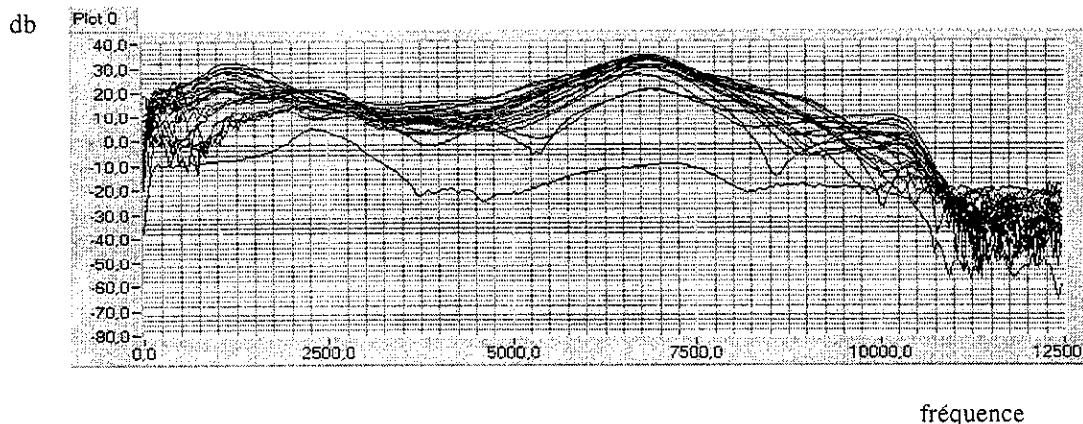


Figure 13 Fonction de transfert du casque intra-auriculaire *Sony* pour baladeur (oreille droite)

Les résultats des mesures ont montré que pour un même casque, l'allure générale des courbes reste la même, mais les détails des fonctions de transfert varient notablement d'un individu à l'autre. De même, d'un essai à l'autre sur un même individu, ces fonctions de transfert variaient sensiblement.

Ces différences dans les fonctions de transfert d'un individu à l'autre sont attribuables en partie à la constitution du canal auditif propre à chaque individu, mais aussi au positionnement du casque sur l'oreille (si le casque reste toujours exactement au même endroit, les réponses des fonctions de transfert sont quasi identiques).

On peut également observer qu'il existe des différences entre les fonctions de transfert de l'oreille droite et gauche d'une même personne. Ces différences peuvent être attribuables à la position du casque sur l'oreille, mais également au fait que chaque conduit auditif possède de subtiles différences (formes de l'oreille interne, résidu de cerumen plus ou moins important, etc.). De plus, on a observé que le fait d'ouvrir la bouche ou d'avaler peut affecter la forme des fonctions de transfert.

4.3.2 Modification du casque *Sennheiser*

La compilation des résultats obtenus a permis de mettre en évidence que le casque standard *Sennheiser* sur lequel on avait fixé un microphone d'erreur (type Electret), présentait les meilleures caractéristiques de stabilité d'un individu à l'autre. Toutefois, il présentait souvent de brusques variations dans le spectre des FT, tel qu'illustré à la Figure 14.

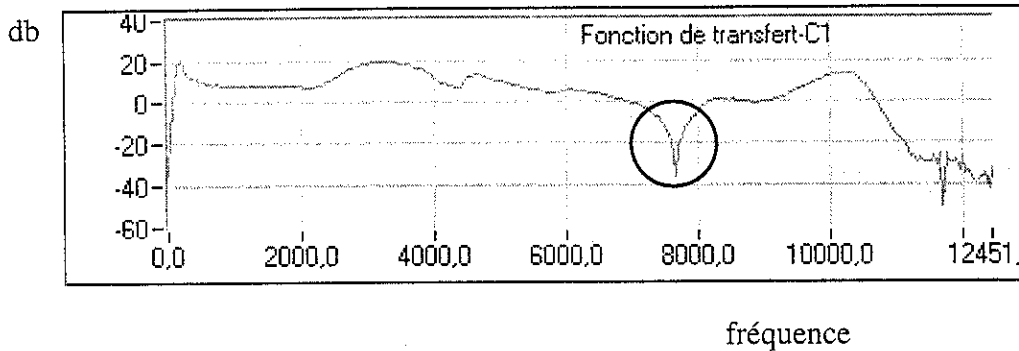


Figure 14 Fonction de transfert du casque Sennheiser avec microphone d'erreur positionné perpendiculairement au haut-parleur.

Ces brusques variations sont souvent problématiques lors du processus de contrôle, puisqu'elles correspondent généralement à un changement de phase de la FT.

Pour tenter d'obtenir une fonction de transfert plus régulière et moins variable d'un individu à l'autre, différentes positions et systèmes de fixation de micro d'erreur ont été envisagés et testés. Les résultats finaux obtenus sont présentés à la Figure 15.

La Figure 15 présente les résultats obtenus pour un casque appelé *Sennheiser2*. Ce casque a la particularité d'avoir son microphone d'erreur fixé dans l'axe du haut-parleur, au centre d'un disque perforé placé en face de la membrane du haut-parleur (Figure 16).

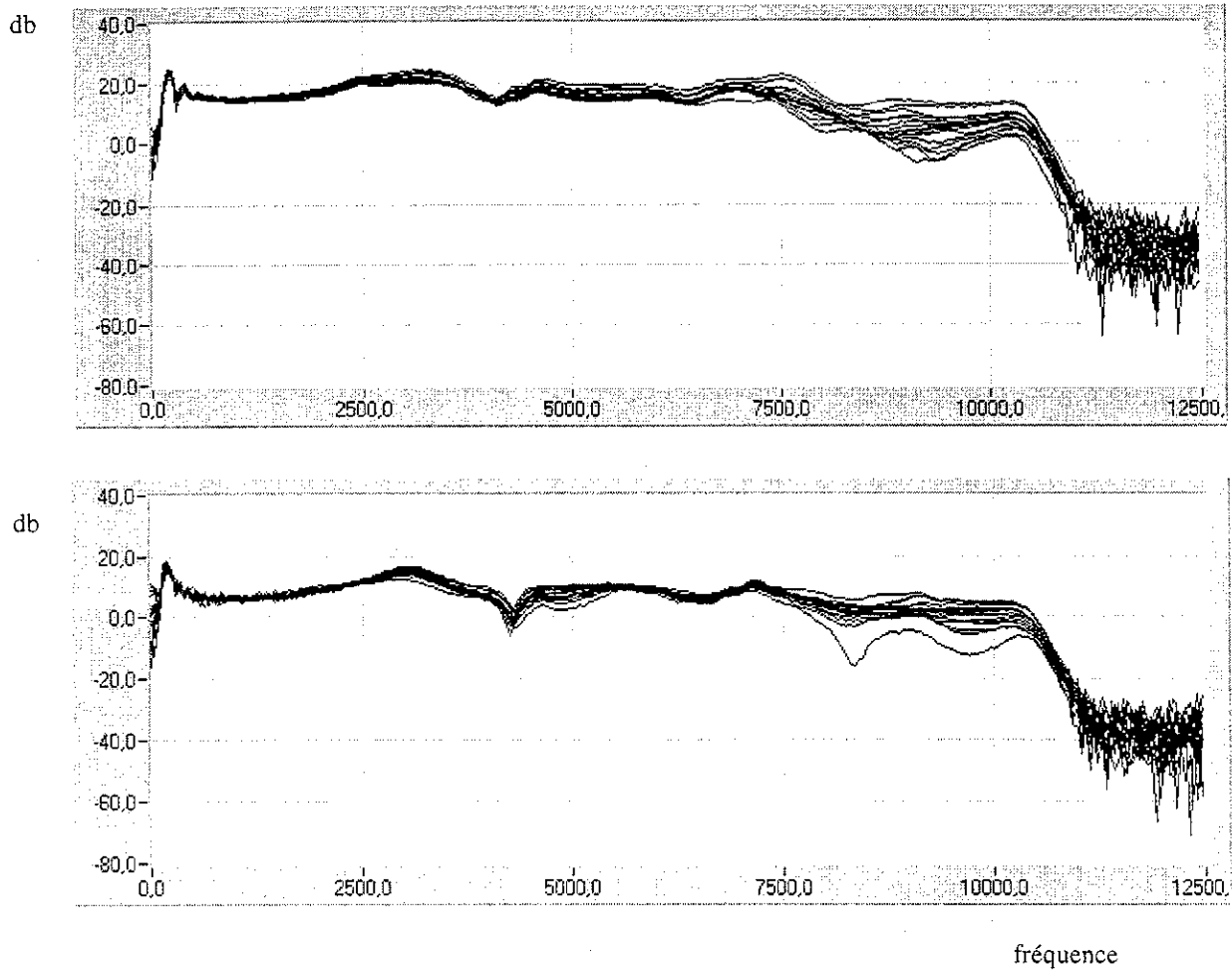


Figure 15 Fonction de transfert du casque *Sennheiser2* (essais non consécutifs sur une personne).

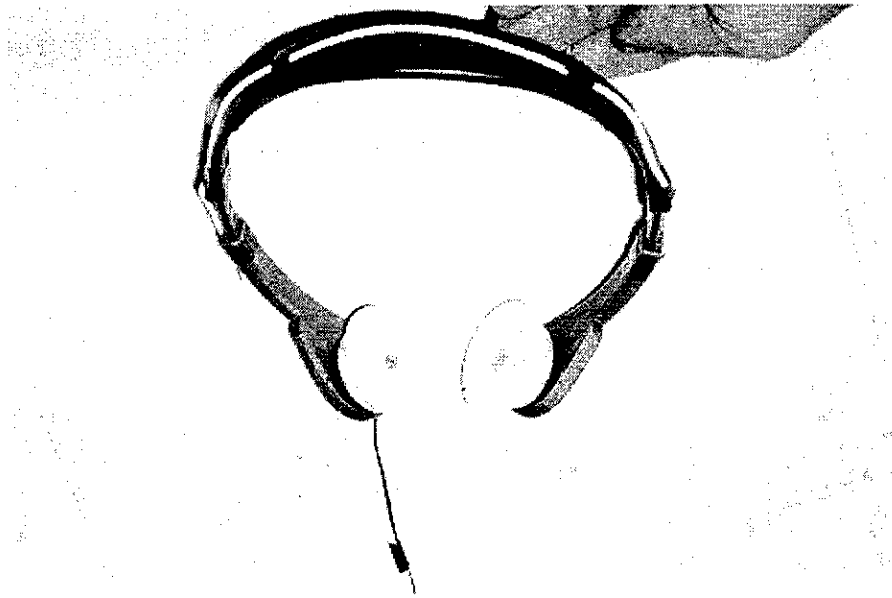


Figure 16 Photo du prototype du casque actif *feedforward*

Les fonctions de transfert mesurées pour ce nouveau casque sont relativement plates et peu variables d'un essai à l'autre, et ce, jusqu'à 7500 Hz. Ce casque présente donc les caractéristiques nécessaires pour rendre possible la mise en œuvre du casque actif *feedforward*, et ce, jusqu'à au moins 7500 Hz.

4.4 *Évaluation et optimisation des performances du système en fonctionnement réel*

Dans une première étape, le pas d'adaptation sera ajusté de façon à obtenir un bon compromis entre rapidité de convergence - vitesse de poursuite et sensibilité aux signaux utiles. Cette détermination a été réalisée à partir de divers essais en laboratoire, avec des perturbations harmoniques et multi-harmoniques générées synthétiquement. Ces essais ont permis d'obtenir les performances décrites dans les prochains paragraphes.

4.4.1 **Rapidité de convergence**

La Figure 17 illustre le signal au microphone lorsque le contrôleur est démarré et que la perturbation est un ton pur à 2500 Hz. Il faut moins de 0,1 seconde au contrôleur pour atténuer de 40 dB la perturbation. Subjectivement, la convergence semble instantanée. Il faut noter cependant que la rapidité de convergence varie en fonction du nombre de composantes fréquentielles présentes dans la perturbation. Plus la perturbation est « riche », plus le contrôleur est lent à converger. Bien que la convergence semble subjectivement instantanée malgré la présence de plusieurs raies à contrôler, le fait qu'elle ralentisse aura un impact négatif sur la vitesse de poursuite.

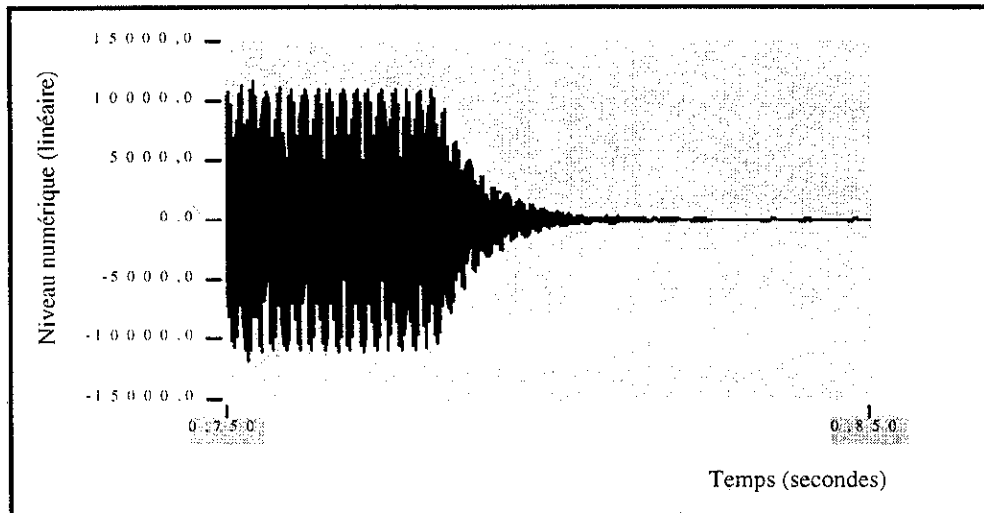


Figure 17 Illustration de la vitesse de convergence pour le contrôle d'un ton pur à 2500 Hz

4.4.2 Vitesse de poursuite d'un déplacement du porteur en fonction de la complexité du champ de bruit

La Figure 18 illustre la capacité du contrôleur à suivre les déplacements du porteur pour la composante à 1000 Hz et la composante à 2500 Hz d'un bruit comportant 2 tons purs (1000 et 2500 Hz). La partie « mouvement du porteur » correspond à un déplacement à une vitesse d'environ 1 mètre/seconde (déplacement très rapide). Nous observons que pendant le déplacement, le contrôleur se désajuste (signal au microphone de plus forte amplitude). Cependant, le niveau de ce désajustement demeure sous le niveau de la perturbation (signal avant convergence). Nous observons aussi que plus la fréquence est élevée, plus le désajustement est important. Ceci est dû à la complexité spatiale du champ acoustique qui augmente avec la fréquence. Plus le champ acoustique est complexe, plus la poursuite par le contrôleur d'un déplacement du porteur est difficile. En fait, la vitesse de poursuite par le contrôleur est dépendante de 2 facteurs :

⇒ la complexité spatiale du champ acoustique et

⇒ la rapidité de convergence du contrôleur.

Comme nous l'avons vu au point 1, la rapidité de convergence est dépendante du nombre de composantes fréquentielles. Il faut donc s'attendre à une dégradation des performances, en terme de vitesse de poursuite, avec l'augmentation du nombre de raies à contrôler.

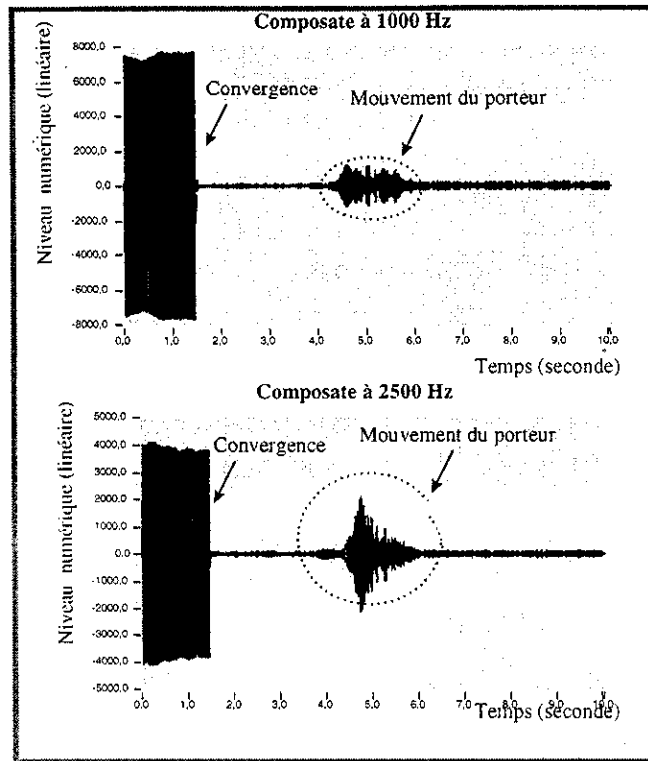


Figure 18 Désajustement du contrôleur pendant le déplacement du porteur

4.4.3 Désajustement du contrôleur en présence de signaux « utiles » (alarmes ou conversations)

Les résultats présentés précédemment correspondent à un pas d'adaptation qui a été choisi de façon à ce que le contrôleur soit à toute fin pratique insensible aux signaux utiles. Un problème qui demeure est la sensibilité du contrôleur aux signaux dont les caractéristiques sont les mêmes que la perturbation primaire, mais qui ne proviennent pas de la source primaire. Par exemple, lors du contrôle d'un ton pur à 1000 Hz, si le porteur siffle (fort !), un signal semblable à la perturbation, le contrôleur se désajuste et peut même diverger. Ce désajustement nécessite donc que les deux conditions suivantes soient réunies :

- *Le signal perturbateur est de même contenu spectral que le signal émis par source primaire.*
- *Le signal perturbateur est de forte intensité.*

On peut s'attendre à ce que cette situation se présente très rarement. L'effet devra être étudié plus en profondeur.

4.4.4 Atténuations

La Figure 19 illustre l'atténuation obtenue sur chaque composante fréquentielle pour une perturbation en contenant 3 (1000Hz, 1800Hz et 4100 Hz). On peut deviner que la courbe pointillée est celle représentant le spectre du signal avant contrôle. On remarque une atténuation d'environ 30 à 40 dB par raie au microphone. Bien que l'atténuation effective perçue par le porteur soit inférieure à ces 30 et 40 dB (l'atténuation au tympan étant différente de celle obtenue au micro d'erreur), la sensation de confort procurée par une telle atténuation est très impressionnante.

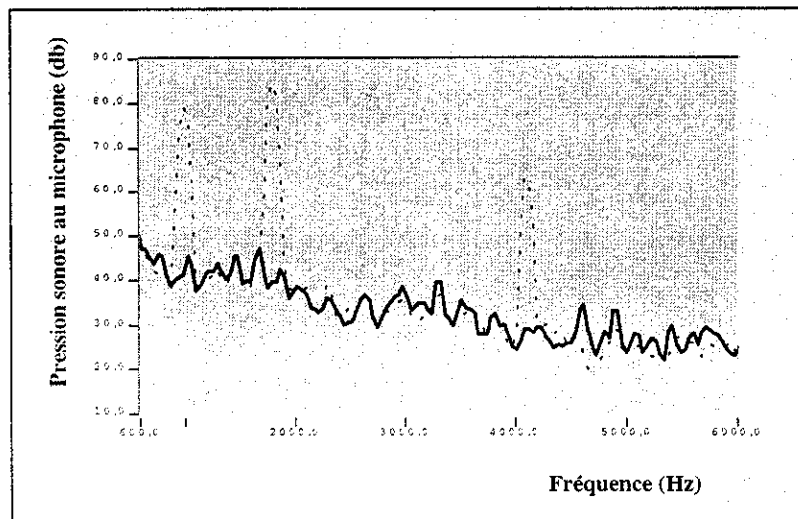


Figure 19 Spectre représentant l'atténuation obtenue pour une perturbation avec 3 raies

4.5 Étude de la robustesse des algorithmes utilisés

Ces 3 raisons peuvent entraîner la divergence de l'algorithme :

- 1- Déplacement du casque de sa position d'identification sur la tête du porteur
- 2- Saturation des signaux au microphone
- 3- Niveau de la perturbation trop important

Divers essais de contrôle avec le casque prototype ont également été réalisés en laboratoire en vue d'analyser ces aspects. Nous avons pu empêcher la divergence lorsqu'il y a saturation des signaux au microphone, en instaurant une pause dans l'adaptation des coefficients du filtre de contrôle.

Les résultats obtenus ont montré qu'en général le contrôleur est relativement insensible aux déplacements du casque sur les oreilles : le contrôle continue de bien fonctionner. Cependant, lorsque le porteur enlève complètement le casque de sur ses oreilles, la fonction de transfert secondaire change dramatiquement avec comme conséquence une divergence assurée de

l'algorithme. En ce qui concerne la saturation du microphone de contrôle, elle entraîne invariablement (et rapidement) la divergence de l'algorithme. Pour contrôler cet effet, on a recours à un « détecteur de divergence », qui peut arrêter le contrôleur lorsqu'il y a une saturation dans le filtre de contrôle (indiquant une divergence). Les performances de ce système se sont avérées très satisfaisantes. Le détecteur est efficace et permet d'arrêter le contrôleur en quelques fractions de seconde lorsqu'il y a divergence.

5. Conclusion

Réalisation majeure découlant du projet

L'objectif général du projet de recherche, soit le développement d'un prototype de protecteur auditif basé sur un algorithme de type *feedforward* assurant la discrimination entre le bruit à réduire et les signaux utiles, a été pleinement atteint. Des démonstrations du fonctionnement et de l'efficacité potentielle de ce casque ont d'ailleurs été faites aux responsables de l'IRSST.

Tous les objectifs spécifiques du programme de recherche ont donc été atteints. Ces objectifs spécifiques étaient :

- La mise en œuvre de l'algorithme de contrôle sur un support DSP point-fixe a été effectuée en 2 étapes, soit :

1. la réalisation d'une plateforme de traitement de signal basée sur un DSP point-fixe
2. l'implantation d'un algorithme de contrôle *feedforward* sur ce support électronique.

Il est à noter que la programmation d'un algorithme de contrôle *feedforward* sur un DSP point fixe était en soi un défi de taille (complexité de la programmation bas niveau et en point fixe), mais qui a permis d'atteindre des performances de contrôle en temps réel satisfaisantes. Les coûts des processeurs de calcul point-fixe étant aujourd'hui relativement faibles (environ 10\$ pour un processeur DSP du type de ceux utilisés sur la carte TMS320C50), il est donc possible d'envisager une version commerciale du produit.

- Une identification « en présence de bruit » fonctionnelle et performante a été implantée. Cette étape était primordiale de façon à rendre le casque utilisable en situations réelles, où la perturbation et/ou un bruit ambiant sont toujours présents pendant l'identification.
- Une étude paramétrique de la réponse électroacoustique de différents montages haut-parleur-microphone des casques d'écoute a été réalisée. L'analyse des résultats de cette étude a permis de mettre au point une configuration actuateur-capteur actif optimale et originale, constituée d'un baladeur standard (i.e *Sennheiser*) auquel a été fixé, parallèlement à l'axe de l'actuateur, le capteur d'erreurs. L'effet de la directivité du microphone d'erreur étant dans ce cas minimum, les fonctions de transfert résultant de ce montage sont très peu variables jusqu'à 7500 Hz et très stables d'un individu à l'autre.

- Un système de détection de divergence a également été conçu et intégré à l'algorithme de contrôle. Le contrôleur peut maintenant détecter lorsque l'algorithme a divergé et arrêter le contrôle, évitant ainsi un mauvais fonctionnement du casque.

6. Perspectives et retombées éventuelles

Les résultats obtenus au cours de ce projet de recherche montrent qu'il est possible de réaliser un casque actif de type *feedforward* ouvert permettant de réduire le bruit de sources perturbatrices tout en laissant passer les bruit utiles. Par rapport au casque classique à coquille ou au casque actif *feedback*, le principe de fonctionnement apparaît très avantageux pour un grand nombre de situations⁶. Finalement, la mise en œuvre sur DSP point fixe de faible coût permet d'envisager très sérieusement la commercialisation d'un tel produit.

Certains éléments restent cependant à développer avant de pouvoir réaliser un casque pratique et facilement utilisable en industrie. On peut regrouper ces éléments en 6 points différents soit :

1. Développement des fonctionnalités algorithmiques permettant une utilisation automatique, facile, rapide et sécuritaire du casque.
2. Conception d'une configuration capteur-actuateurs améliorée en vue d'augmenter l'efficacité perçue en haute fréquence.
3. Détermination des spécifications et réalisation du lien RF nécessaire pour la transmission du signal de référence.
4. Développement d'un prototype portable (électronique de contrôle et lien RF).
5. Essais et optimisation des performances du casque en milieu industriel.
6. Évaluation de l'efficacité du casque selon des standards audiolologiques reconnus.

Les paragraphes ci-dessous décrivent brièvement les développements à réaliser sur chacun de ces points.

6.1 Développement de fonctionnalités d'automatisation

Pour l'utilisation du casque en milieu industriel, certains aspects du processus de contrôle devront être automatisés. Mentionnons entre autres le processus d'identification, la détection de non-convergence, la robustesse générale et la réinitialisation automatique.

- Démarrage automatique de l'identification lorsque l'utilisateur dépose le casque sur ses oreilles.

⁶ Typiquement des situations où le bruit nuisible est généré par un équipement facilement identifiable et instrumentable (capteur amont) et où le bruit est constitué de tons purs, même hautes fréquences.

Comme l'identification doit avoir lieu lorsque le casque est bien positionné sur les oreilles, il serait utile d'instaurer un processus automatique qui détecterait le bon moment pour démarrer l'identification.

■ Détection de la non-convergence

Il a été observé pendant les tests que, dans certaines circonstances, l'algorithme refuse tout simplement de converger, sans nécessairement diverger. Ces non-convergences peuvent se produire par exemple lorsque la perturbation n'est pas harmonique, lorsque la fonction de transfert secondaire a été mal identifiée ou lorsqu'un bruit provenant d'une source autre que la source primaire est de très forte intensité. Il serait nécessaire de détecter la non-convergence et faire en sorte que l'algorithme modifie automatiquement ses paramètres de façon à assurer une bonne convergence.

■ Étude de l'effet sur le contrôle d'un bruit dont les caractéristiques spectrales sont les mêmes que celles de la perturbation primaire.

Des tests de divergence nous ont permis de remarquer qu'un bruit ne provenant pas de la source primaire peut faire diverger l'algorithme de contrôle si ses caractéristiques spectrales sont semblables à celles de la perturbation primaire. Bien que cette situation ne risque de se produire que très rarement, il vaudrait la peine d'approfondir notre compréhension du phénomène et d'y trouver une solution.

6.2 Détermination des spécifications et réalisation du lien Radio-Fréquence pour le signal de référence

Dans le prototype actuel du casque *feedforward*, la référence nécessaire à l'algorithme de contrôle est transmise directement à l'aide d'un lien physique (fil), à l'électronique du contrôleur.

Pour son utilisation en milieu industriel, il apparaît essentiel d'avoir un lien radio plutôt que physique afin de ne pas affecter la mobilité du travailleur. Un lien radio n'est cependant pas toujours parfait (suivant la puissance de l'émetteur et du champ électromagnétique du milieu de travail).

Il apparaît donc nécessaire de non seulement développer un lien radio pour la transmission du signal de référence, mais aussi de s'assurer que cette transmission soit suffisante pour ne pas réduire la performance du contrôleur dans des conditions d'opération normale.

Dans cette étape il faudra donc :

- déterminer les circonstances minima dans lesquelles le lien Radio-Fréquence devra assurer une performance optimale du contrôleur;
- déterminer la technologie de transmission optimum (qui, entre autres, n'affectera pas le processeur de calcul et autre composante du système);
- analyser l'influence que pourra avoir une diminution de la qualité du signal de référence sur la performance du contrôleur;

- développer et réaliser l'électronique de détection (accéléromètres, capteurs optiques ou autres) et de transmission;
- développer et intégrer l'électronique de réception dans le boîtier portatif du contrôleur.

6.3 Optimisation de la position du microphone d'erreur et de la réduction de bruit perçue

Actuellement, le contrôleur permet de minimiser le champ sonore au microphone d'erreur jusqu'à environ 10kHz. Cependant, l'efficacité *perçue* par un individu s'arrête généralement aux environs de 4000 Hz. Cette différence provient de la localisation du microphone d'erreur par rapport au conduit auditif.

Pour augmenter l'efficacité apparente du casque, il sera nécessaire d'optimiser la localisation du microphone d'erreur par rapport au conduit auditif, sans toutefois nuire à la stabilité des fonctions de transfert haut-parleur-microphone.

6.4 Conception et réalisation d'un casque prototype pré-production

Cette étape se déroulera comme suit:

1. Choix de la plate-forme (méthode de chargement⁷, processeur de calcul (DSP), etc.)
2. Conception et réalisation de l'électronique de contrôle et de ses périphériques. Cette partie du travail nécessitera entre autres :
 - a. le développement de préamplificateurs de microphones intégrés;
 - b. la conception d'une carte DSP à 3 entrées (2 micros et 1 référence);
 - c. l'intégration du lien radio (Radio-Fréquence) avec le contrôleur;
 - d. la conception et la réalisation d'une alimentation batterie;
 - e. la conception d'un système de chargement de code automatique (si pertinent).

6.5 Validation du fonctionnement en milieu industriel

Pour vérifier la fiabilité du casque et les problèmes potentiels d'applicabilité en milieu industriel, une fois le prototype précommercial réalisé, des essais in situ devront être réalisés afin d'évaluer une fiabilité du système pour différents types de bruit harmonique, différents postes de travail (importance du bruit de fond et/ou autre type de bruit) et différents contextes d'utilisation (qualité de positionnement du casque, présence de chapeau de protection ou non, etc.).

6.6 Évaluation de l'efficacité du casque selon des standards audiologiques reconnus

Jusqu'à présent, pour évaluer l'efficacité du système de contrôle dans ce travail, nous n'avons considéré que la réduction de bruit obtenue au microphone d'erreur, et non pas celle effectivement perçue par l'utilisateur. Or l'atténuation au microphone d'erreur ne correspondra pas à celle perçue par l'utilisateur, notamment lorsque l'on monte en fréquence.

⁷ Le chargement est l'étape qui consiste à transférer le code des algorithmes de contrôle sur les DSPs.

Dans un document récent produit pour le compte du ministère de la Défense nationale, Abel et Giguère (1997) ont fait une revue de la littérature sur les méthodes et normes reliées à la mesure de l'atténuation des protecteurs auditifs. Selon cette revue, il appert qu'il n'y a pas actuellement de normes ou de méthodes fiables pour la mesure de l'atténuation offerte par les protecteurs qui intègrent le contrôle actif du bruit. Qui plus est, le casque actif *feedforward* n'étant pas orienté strictement vers une atténuation maximale afin de limiter le risque d'atteinte à l'audition, mais aussi vers la sécurité des utilisateurs en rendant les signaux utiles toujours perceptibles, une méthode et/ou de nouveaux critères d'évaluation devront être considérés pour évaluer sa performance effective.

Pour réaliser une étude de commercialisation du casque actif *feedforward*, il sera donc nécessaire de déterminer les critères permettant une juste évaluation de l'efficacité qu'apportera ce casque.

7. RÉFÉRENCES

- [1] Sen M. Kuo, Dennis R. Morgan, *Active Noise Control Systems: Algorithms and DSP Implementations*, John Wiley & Son, 1996
- [2] S.J. Elliott, P. Joseph, A.J. Bullmore et P.A. Nelson, « Active cancellation at a point in a pure tone diffuse sound field », *Journal of sound and vibration* 120, pp. 183-189, 1988a.
- [3] B. Widrow et S.D. Stearns, *Adaptive Signal Processing*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1985.
- [4] DSP Processor Fundamentals, architectures and features, Phil Lapsley, Jeff Bier, Amit Shoham, Edward A. Lee. IEEE Press, 1997
- [5] Virginie Montagud, Casque actif anti-bruit ouvert de configuration *feedforward*. Mémoire de maîtrise en génie électrique, Université de Sherbrooke, Avril 1996
- [6] Pierrick Dano, *Réalisation d'un casque actif anti-bruit de configuration feedforward*. Mémoire de maîtrise en génie électrique, Université de Sherbrooke, octobre 1994.
- [7] Stéphane Boucher, *Casque actif anti-bruit ouvert de configuration feedforward : vers une version commercialisable*, Mémoire de maîtrise en génie électrique, Université de Sherbrooke, décembre 1998
- [8] Paillard, B., Le Dinh, Chon Tam, Berry, A. and Nicolas, J. *Accelerating the convergence of the filter-x least mean squares algorithm through transform-domain optimisation*, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Volume 9, No. 4, Juillet 1995

- [9] Anthony J. Brammer, Georges J. Pan, R. Brian Crabtree - *Adaptive Feedforward Active Noise Reduction Headset for Low-Frequency Noise* – Institute for Microstructural Sciences, National Research Council, Ottawa, Ontario K1A 0R6
- [10] Mingsian Bai, Dunjay Lee – *Implementation of an active headset by using the $H\omega$ robust control theory* – J. Acoust. Soc. Am. 102(4), October 1997
- [11] Boaz Rafaely, Stephen J. Elliott – *$H_2 / H\omega$ Active Control of Sound in a Headrest : Design and Implementation* – IEEE Transactions on Control Systems Technology, vol. 7, No1, January 1999
- [12] Volker Bartels – *Headset with active noise reduction system for mobile applications* – 90th convention of AES, 1991 February 19-22
- [13] Jean Christophe Béra, Michel Sunyach, Karl Buck – *Testing of different types of hearing protectors* – Acta Acustica 3 (1995) 203-207
- [14] Elizabeth A. Goodfellow – *A rototype Active Noise Reduction In-Ear Hearing Protector* – Applied Acoustics 42 (1994) 299-312

8. Composition de l'équipe depuis le début du projet :

Nom	Statut	Travaux
Pierrick Dano	Étudiant à la maîtrise, génie électrique	Première maîtrise portant sur le casque actif [6] (Phase préalable financée par le CRSNG)
Virginie Montagud	Étudiante à la maîtrise, génie électrique	Deuxième maîtrise portant sur le casque actif [5] (Phase préalable financée par le CRSNG)
Stéphane Boucher	Étudiant à la maîtrise, génie électrique	Troisième maîtrise portant sur le casque actif [7]
Étienne Lagacé	Stagiaire, Groupe d'Acoustique de l'Université de Sherbrooke	Tests et optimisation du casque au niveau acoustique