

1995

Détermination des caractéristiques acoustiques optimales des alarmes de recul

Chantal Laroche
Sonométrie Inc.

Marie-Josée Ross
Sonométrie Inc.

Louis Lefebvre
Sonométrie Inc.

Richard Larocque
Sonométrie Inc.

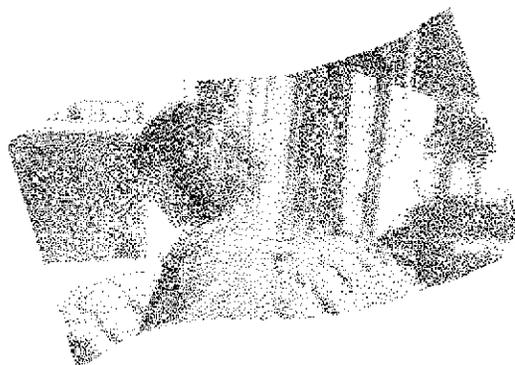
Suivez ce contenu et d'autres travaux à l'adresse suivante: <https://pharesst.irsst.qc.ca/rapports-scientifique>

Citation recommandée

Laroche, C., Ross, M. J., Lefebvre, L. et Larocque, R. (1995). *Détermination des caractéristiques acoustiques optimales des alarmes de recul* (Rapport n° R-117). IRSST.

Ce document vous est proposé en libre accès et gratuitement par PhareSST. Il a été accepté pour inclusion dans Rapports de recherche scientifique par un administrateur autorisé de PhareSST. Pour plus d'informations, veuillez contacter pharesst@irsst.qc.ca.

Détermination des caractéristiques acoustiques optimales des alarmes de recul



ÉTUDES ET RECHERCHES

Chantal Laroche

Décembre 1995 R-117

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,

**Détermination
des caractéristiques
acoustiques optimales
des alarmes de recul**

Chantal Laroche, Marie-Josée Ross,
Louis Lefebvre, Richard Larocque,
Sonométrie Inc.

**IRISSST
RECHERCHES**

RAPPORT

TABLE DES MATIÈRES

TABLE DES MATIÈRES		i
1.0	INTRODUCTION	1
2.0	PREMIÈRE PARTIE: INVENTAIRE DES CONNAISSANCES RELATIVES AUX ALARMES DE REcul	1
2.1	Inventaire des normes et réglementations.....	1
2.2	Recherche de brevets portant sur les alarmes de recul.....	5
2.3	Inventaire d'avertisseurs sonores de marche arrière.....	6
2.4	Recherche bibliographique.....	13
2.5	Inventaire des véhicules lourds impliqués dans des accidents de recul.....	14
2.5.1	Informations quantitatives.....	14
2.5.2	Informations qualitatives.....	18
2.6	Synthèse.....	20
3.0	PHÉNOMÈNE D'HABITUATION AUDITIVE	21
3.1	Introduction.....	21
3.2	Modèle conceptuel de Wilkins (La perception d'avertisseurs sonores).....	21
3.2.1	Audibilité.....	21
3.2.2	Sollicitation de l'attention.....	22
3.2.3	Reconnaissance.....	22
3.4	Variables de l'habituation au niveau de l'audition.....	23
3.4.1	Amplitude.....	23
3.4.2	Fréquence du signal sonore.....	23
3.4.3	Rythme de présentation du stimulus.....	23
3.4.4	Patron temporel du stimulus.....	24
3.5	Synthèse.....	24
4.0	CONCLUSION DE LA PREMIÈRE PARTIE	25
5.0	DEUXIÈME PARTIE: ESSAIS TERRAIN ET MISE AU POINT D'UN MODÈLE DE PROPAGATION SONORE	27
6.0	MÉTHODES	27
6.1	Choix des véhicules lourds et des alarmes de recul.....	27
6.2	Expérimentation en laboratoire.....	27
6.3	Mesures sur le terrain.....	28
6.3.1	Instruments.....	28
6.3.2	Choix des sites de mesure.....	28
6.3.3	Conditions climatiques.....	29
6.3.4	Déroulement des mesures.....	29
6.4	Analyse des données.....	30
6.4.1	Mesures en laboratoire.....	30
6.4.2	Mesures sur le terrain.....	30
6.5	Mise au point du modèle de propagation sonore.....	30
6.6	Validation du modèle de propagation sonore.....	33
7.0	RÉSULTATS	33
7.1	Mesures en laboratoire.....	33

7.2	Mesures sur le terrain.....	34
7.3	Modèle de propagation sonore.....	37
7.3.1	Présentation du logiciel ALARME.....	37
7.3.2	Comparaison des prédictions du logiciel ALARME avec les résultats acquis sur le terrain.....	37
8.0	DISCUSSION.....	43
9.0	CONCLUSION DE LA DEUXIÈME PARTIE.....	45
10.0	TROISIÈME PARTIE: MISE AU POINT D'UN STIMULATEUR D'ALARME DE REcul ET IDENTIFICATION DES CARACTÉRISTIQUES ACOUSTIQUES ET D'EMPLACEMENTS OPTIMAUX.....	46
11.0	MÉTHODE.....	47
11.1	Recherche des paramètres acoustiques et d'emplacements optimaux.....	47
11.2	Conception d'un stimulateur d'alarme de recul respectant les caractéristiques acoustiques optimales.....	48
11.3	Mesures in-situ.....	48
11.3.1	Véhicules utilisés.....	48
11.3.2	Instruments.....	48
11.3.3	Site de mesure.....	49
11.3.4	Conditions climatiques.....	49
11.3.5	Déroulement des mesures.....	49
11.4	Analyse des données.....	49
11.5	Validation du modèle de propagation.....	50
11.6	Validation du stimulateur d'alarme auprès d'utilisateurs.....	50
11.7	Perception des alarmes de recul par les travailleurs atteints de surdité professionnelle: simulations avec Détectson ^{MD}	51
12.0	RÉSULTATS.....	54
12.1	Simulations vs mesures in-situ.....	57
12.2	Évaluation des alarmes au niveau de la propagation sonore.....	57
12.3	Évaluation des alarmes par des utilisateurs.....	64
12.4	Simulations avec Détectson ^{MD}	48
13.0	DISCUSSION.....	69
13.1	Paramètres acoustiques optimaux des alarmes de recul.....	69
13.2	Emplacement des alarmes de recul.....	70
13.3	Perception des alarmes de recul par les travailleurs atteints de surdité professionnelle.....	70
13.4	Révision du règlement 3.10.12 du Code de sécurité pour les travaux de construction.....	71
14.0	CONCLUSION DE LA TROISIÈME PARTIE.....	72
15.0	APPLICABILITÉ DES RÉSULTATS ET RETOMBÉES ÉVENTUELLES.....	74
	RÉFÉRENCES.....	75
	ANNEXES.....	78

1.0 INTRODUCTION

Le comité de la réglementation sur le Code de sécurité sur les chantiers de construction (composé de membres du patronat, du syndicat et de la CSST) a formulé le désir que soit réalisée une étude qui permettrait de réduire significativement le nombre d'accidents reliés au recul des véhicules lourds comportant ou non une alarme de recul. En fait, le comité désire réviser l'article 3.10.12 du Code de sécurité (1987) qui prévoit la conformité des alarmes de recul avec la norme SAE-J994 (1985).

Une récente étude (Laroche et al., 1990) menée conjointement par le Groupe d'Acoustique de l'Université de Montréal (GAUM) et le Groupe d'Acoustique de l'Université de Sherbrooke (GAUS) a permis de démontrer que la propagation sonore des alarmes de recul limite l'audibilité de ces dernières et peut compromettre la sécurité des travailleurs.

Afin d'atteindre l'objectif ultime de réduire le nombre et la gravité des accidents impliquant le recul de véhicules lourds, un projet global a été soumis à l'IR SST en 1991. Ce projet a été scindé en trois parties distinctes. La première partie portait sur l'inventaire des brevets, des véhicules lourds, des réglementations, des normes et des accidents relatifs aux alarmes de recul ainsi que sur le phénomène d'habituation auditive (Ross et al., 1992). Elle s'est terminée en mai 1992. La deuxième étape portait sur des mesures terrain et la mise au point d'un modèle de propagation sonore (Laroche et al., 1993). Le rapport final de ce projet a été déposé en mars 1993. La troisième phase avait pour but de mettre au point un simulateur d'alarme de recul et d'identifier les caractéristiques acoustiques et d'emplacements optimaux sur les véhicules lourds (Lefebvre et Laroche, 1995). Ce projet s'est terminé en avril 1995. Le présent rapport fait état des principaux résultats associés aux trois parties.

2.0 PREMIÈRE PARTIE: INVENTAIRE DES CONNAISSANCES RELATIVES AUX ALARMES DE REcul

La première phase du projet visait à recueillir le maximum d'informations sur les six points suivants:

- a) Normes et réglementations relatives aux alarmes de recul dans divers pays
- b) Brevets sur des alarmes de recul
- c) Alarmes de recul disponibles dans divers pays
- d) Publications portant sur la problématique des alarmes de recul
- e) Véhicules lourds le plus souvent impliqués dans les accidents de recul sur les chantiers de construction
- f) Phénomène d'habituation auditive

Le Centre Canadien d'Innovation Industrielle (CCII) a été mandaté par Sonométric Inc. pour effectuer la recherche de documents portant sur les points a), b), c) et d) mentionnés ci-haut. Après avoir pris connaissance de l'ensemble de ces informations, Sonométric Inc. a procédé à la synthèse de tous les documents jugés pertinents. Les points e) et f) ont été entièrement réalisés par Sonométric Inc.

2.1 Inventaire des normes et des réglementations

L'inventaire des normes et des réglementations a été réalisé par envoi de demandes d'informations à travers le Canada, les Etats-Unis et plusieurs pays d'Europe. Les personnes sollicitées n'ont pas toutes répondues à notre demande. Malgré tout, les informations reçues nous permettent de constater que les réglementations en vigueur sont plus ou moins détaillées et explicites. Nous présentons dans les paragraphes qui suivent un résumé des informations obtenues, par pays.

Canada

Informations demandées: Canada, Québec, Territoires du Nord-Ouest, Terre-Neuve, Alberta, Colombie-Britannique

Informations reçues: Canada, Québec, Territoires du Nord-Ouest, Alberta, Colombie-Britannique

Source: Guide du règlement du Canada sur l'hygiène et la sécurité au travail

Règlement: Les appareils mobiles doivent comporter un klaxon si l'appareil se déplace à une vitesse de plus de 8 km/h ou en marche arrière

Source: Province de Québec, Code de sécurité pour les travaux de construction (articles 3.10.5 Signaleurs et 3.10.12 Avertisseurs)

Règlement: 3.10.5: 1) Lorsqu'un véhicule automoteur fait marche arrière, un signaleur doit diriger le conducteur si ce déplacement peut mettre en cause la sécurité d'un travailleur ou du conducteur.

2) Si le conducteur d'une grue, d'une pelle mécanique ou de tout autre engin de construction a la vue obstruée lors d'une manoeuvre quelconque, il doit être guidé par un ou plusieurs signaleurs

3.10.12: 2) Doivent être munis d'un klaxon automatique pour la marche arrière:

- a) les camions à benne basculante;
- b) les camions bétonnières
- c) les camions de service ayant une capacité nominale de 2250 kg ou plus et servant à l'entretien ou à l'approvisionnement de l'équipement sur le chantier de construction;
- d) les camions équipés d'une grue auxiliaire pour la manutention de matériaux;
- e) les camions servant aux travaux sur les lignes de distribution et de transport d'énergie électrique équipés avec grue tarière, nacelle et autre équipement de même nature; et
- f) le klaxon automatique doit avoir une intensité supérieure au bruit de l'équipement sur lequel il est installé avec un son distinct. Si le klaxon automatique est électrique, il doit en plus être conforme à la norme "Performance Test and Application Criteria for Electrically Operated Backup Alarm Devices" SAE J994b-1985 *.

* Il s'agit d'une norme américaine, voir section États-Unis

Source: Province of Alberta, Occupational health and safety act, General safety regulation (article 104)

Règlement: (1) Si, durant l'opération d'un équipement mobile pesant plus de 6000 kg, l'opérateur n'a pas une visibilité suffisante pour détecter les travailleurs situés près de l'équipement mobile en question, l'employeur doit s'assurer que le dit équipement mobile soit équipé d'un système automatique qui a) avertit les travailleurs situés dans le trajet du véhicule lourd b) arrête le véhicule lourd lorsque des travailleurs sont situés sur son trajet.

(2) Lorsque l'alarme est un système d'alarme sonore, l'employeur doit s'assurer que ce système a) respecte la norme J994b, sept. 1980, "Alarm - Back-up - Electric - Performance, Test and Application", b) émette un son distinct qui émerge de 3dBA du bruit ambiant du site de travail et c) émette un son qui ne sera pas annulé par les harmoniques de l'engin à la grandeur de la zone d'opération de l'engin.

Source: Province of British Columbia, Workers Compensation Act, Industrial Health and Safety Regulations (section 26.04)

Règlement: (1) Tout véhicule mobile** doit être équipé d'un avertisseur sonore.

** véhicule mobile signifie tout véhicule sur roues ou sur chenilles comprenant les remorques mais excluant les véhicules circulant sur rails fixes ou tout véhicule sous la juridiction de "Mines Regulation Act" ou de "Coal Mines Regulation Act".

Source: Northwest Territories, Occupational Health & Safety Regulations, Safety Act, part VI Construction and Maintenance, article 206 et part II Accident Prevention, article 33

Règlement: 206: Tout véhicule mobile doit être équipé d'un signal d'alarme sonore ***.

33: (1) Tout employeur doit prendre les mesures nécessaires pour s'assurer que les niveaux de bruit sur un site de travail n'excèdent pas les limites indiquées au tableau ci-dessous.

Sound level (dBA)	Maximum permitted duration (hours per day)
80	16
85	8
90	4
95	2
100	1
105	1/2
110	1/4
115	1/8
greater than 115	0

(2) Si les niveaux de bruit sur un site de travail excèdent les limites indiquées au tableau 1, l'employeur doit fournir des protecteurs auditifs à ses employés qui soient conformes à la norme CSA Z94.2-M1984 "Hearing Protectors", et personne ne doit travailler lorsque de tels niveaux de bruit existent sans porter ces protecteurs auditifs. R-022-88,s.9.

*** on ne spécifie pas s'il s'agit d'une alarme de recul.

États-Unis

Informations demandées: Californie, Massachussets, New-York, Illinois

Informations reçues: Californie, Massachussets

Source: Etat de Californie, code du véhicule (Vehicule code) 1991, Department of Motor Vehicles, Sacramento, California (division 12 : Horns or Warning devices)

Règlement: Tout camion à rebus après sept. 83, doit être équipé d'une alarme automatique

Source: Etat du Massuchets, occupational Safety and Health administration, OSHA labor (1926.601 Motor Vehicles et 1926.602 Material Handling, Equipment)

Règlement: On entend par véhicules motorisés ceux qui opèrent à l'extérieur des voies de circulation ouvertes au public.

Aucun employeur ne doit utiliser un véhicule motorisé ayant une visibilité réduite à l'arrière à moins que le véhicule ait une alarme de recul sonore ayant un niveau de bruit supérieur au niveau de bruit ambiant ou à moins que le véhicule qui recule soit assisté d'un signaleur.

Cette règle s'applique aux types d'équipements suivants: niveleuses, chargeuses, béliers mécaniques, camions hors-route, tracteurs et tout autre équipements similaires.

Tout véhicule bi-directionnel (rouleaux compresseurs, béliers mécaniques, etc.) doit être équipé d'un signal avertisseur lorsque la visibilité à l'arrière est réduite.

Source: Society of Automotive Engineers (SAE) Recommended Practice, alarm-backup-electric-performance, test, and application-SAE J994 mar85

Norme: Cette norme établit quatre critères pour les alarmes de recul électriques installées sur la machinerie mobile industrielle et de construction.

- a) Exigences sur les performances des mécanismes des alarmes de recul
- b) Techniques de mesure des performances des alarmes
- c) Tests environnementaux en laboratoire (ex.: conditions de température limites)
- d) Actionnement de l'alarme sur le véhicule

Il existe cinq classes d'alarme: classe A-112dBA, classe B-107dBA, classe C-97dBA, classe D-87dBA, classe E-77dBA. La classe est déterminée à l'aide d'une méthode de mesure qui spécifie entre autres que la mesure du niveau sonore doit être effectuée en champ libre à 1,2m au-dessus du sol, à une distance de 1,2m de l'alarme, à un angle de zéro degré selon l'axe horizontal.

France

Source: AFNOR recommande une norme (elle n'est pas obligatoire) (p.6 NFE 58-050, section 12.1 "Avertisseur Automatique de Recul")

Norme: Les engins doivent être munis d'un avertisseur principal dont le niveau est d'au moins de 100 dBA à 7m. En outre, les décapeuses doivent être équipées d'un avertisseur automatique de recul distinct quant à ses caractéristiques acoustiques; il en est de même pour les engins dont le plancher inférieur du poste de conduite est à plus de 2m au-dessus du sol.

Allemagne

Il n'y aurait pas de réglementation concernant les alarmes de recul. Ces dernières seraient même interdites.

Suède

Il n'y a pas de normes écrites mais les camions en sont munis. Le principal fabricant serait allemand (Bosch).

Angleterre

Source: Règlement britannique 37 "The Road Vehicles (Construction and Use Regulations) 1986".

Règlement: Une alarme de recul sur un véhicule motorisé ne doit pas être stridente. Les caractéristiques sur le type de signal émis par les alarmes sont très restrictives. Les sirènes, les cloches, les "gong" ainsi que les alarmes à deux tons (two tone horn) sont prohibés à l'exception de certains véhicules d'urgence ou d'utilité publique.

Italie

Il n'existe pas de réglementation en matière d'avertisseur sonore de marche arrière pour les véhicules lourds circulant en Italie. L'Italie suit les règlements communautaires qui sont repris dans la directive 70388 pour les véhicules lourds.

Nous n'avons pu obtenir une copie de cette directive.

En pratique, seuls les véhicules provenant de pays étrangers seraient munis d'avertisseurs sonores de marche arrière.

Synthèse

Plusieurs règlements obligent l'utilisation d'alarmes de recul en tout temps ou lorsque la visibilité est réduite. L'Alberta et l'état du Massachussetts se démarquent en spécifiant que le niveau de bruit de l'alarme doit dépasser le niveau de bruit environnant.

L'Alberta spécifie également que le son émis par l'alarme ne doit pas être annulé par les harmoniques de l'engin à la grandeur de la zone d'opération de l'engin. Par contre, aucun règlement ne fait mention d'un éventuel moyen de prévention des phénomènes d'annulation d'ondes acoustiques émises par l'alarme à l'arrière des véhicules.

Finalement, il ressort de cette recherche que très peu de règlements réfèrent à une norme. Seuls les règlements des provinces du Québec et de l'Alberta ainsi que celui de la France réfèrent à une norme.

2.2 Recherche de brevets portant sur les alarmes de recul

Une recherche de brevets a été effectuée par le CCII au Service de recherches technologiques du Bureau des Brevets. Il s'agit d'une recherche non exhaustive basée sur un échantillonnage de documents de brevets. Une recherche exhaustive dans ce domaine serait très coûteuse.

Pour éviter d'alourdir le texte, seuls les numéros et noms des brevets seront présentés ici. Pour une description détaillée des brevets, le lecteur est invité à consulter le rapport de Ross et al. (1992).

Brevet no. 651,148, 30 octobre 1962	Motor vehicle back-up signal device
Brevet no. 549,472, 28 novembre 1957	Reverse alarm
Brevet no. 3,960,104, 1 juin 1976	Back-up alarm with improved keeper
Brevet no. 3,793,982, 26 février 1974	Reverse motion alarm
Brevet no. 3,429,290, 25 février 1969	Warning bell for vehicles moving in reverse
Brevet no 3,034,473, 15 mai 1962	Back-up alarm
Brevet no 2,979,020, 11 avril 1961	Transmission driven backup alarm
Brevet no 2,957,443, 25 octobre 1960	Reverse movement alarm for use on vehicles
Brevet no 4,603,317, 29 juillet 1986	Electrically-operated backup alarm

Parmi les brevets qui ont été répertoriés, le brevet no. 4,603,317 est sans contredit le plus intéressant. En effet, le système d'alarme qui y est décrit utilise une technologie moderne qui permet d'ajuster le niveau de bruit de l'alarme au-dessus du niveau de bruit ambiant qui règne sur les chantiers. Toutefois, même si cette technologie augmente grandement les chances d'audibilité du signal d'alarme, elle ne la garantit pas. En effet, les phénomènes d'annulation d'ondes peuvent quand-même se produire et créer ainsi des zones de forte atténuation acoustique à l'arrière du véhicule.

2.3 Inventaire d'avertisseurs sonores de marche arrière

De nombreux manufacturiers et distributeurs ont été contactés à travers le monde. La demande d'information était axée sur le contenu en fréquences du signal, la puissance acoustique ou le niveau de pression acoustique ainsi que la nécessité que le produit soit applicable aux véhicules lourds.

Un résumé des caractéristiques recueillies est présenté au tableau 1. Les manufacturiers ou les distributeurs n'ont pas toujours fournis tous les renseignements demandés. Malgré ce fait, les informations obtenues nous permettent de connaître les tendances du marché.

Dans la grande majorité des cas, les alarmes émettent un signal de type pulsé (bip-bip). Les fréquences, lorsqu'elles sont spécifiées, se situent principalement à 1000 Hz et plus. Il existe quelques produits qui émettent des signaux complexes mais ces alarmes sont davantage conçues pour des applications statiques (ex.: alarme sur la corniche d'un bâtiment industriel) ou encore pour des applications beaucoup moins rudes que celles des chantiers de construction. Quelques alarmes ont un contenu en basses fréquences (500 Hz ou moins).

En ce qui concerne le niveau de pression acoustique des alarmes de recul, il varie entre 80 et 112 dB. La plupart des manufacturiers indiquent le niveau de pression sonore en décibel linéaire à une distance donnée. Quelques manufacturiers ou distributeurs offrent des alarmes qui s'ajustent en fonction du niveau de bruit ambiant. Cela évite d'irriter inutilement les travailleurs par des niveaux de bruit trop élevés. D'autre part, ce type d'alarme assure (jusqu'à un certain niveau de bruit ambiant) que le niveau du signal est supérieur au niveau de bruit ambiant. Il existe aussi sur le marché une alarme utilisant la voix humaine synthétisée comme signal d'avertissement.

Plusieurs des alarmes répertoriées respectent la norme SAE J994. Il s'agit d'une norme américaine sur les alarmes de recul (voir section 2.1). Le respect de cette norme ne garantit aucunement l'audibilité du signal d'alarme à l'arrière du véhicule. De plus, elle ne fournit aucune spécification sur l'installation des alarmes et sur les fréquences que ces alarmes doivent générer.

La plupart des alarmes répertoriées sont du même type: ton pulsé (bip-bip) ou modulé, fréquence pure ou rapprochée (1000 Hz et plus) et niveau de bruit fixe. Un de ces types d'alarme a toutefois la caractéristique d'ajuster constamment son niveau de bruit au-dessus du niveau de bruit environnant. Ce type d'alarme devrait être étudié afin de vérifier son bon fonctionnement sur le terrain. Toutefois, compte tenu du signal émis par ce type d'alarme (tons purs), tout porte à croire que les patrons d'annulation d'ondes qui créent des zones de forte atténuation sonore ne pourront être évités.

Certaines alarmes possèdent des signaux sonores complexes (voix humaine synthétisée, "yelp", "yoddle", balayage, etc.) mais ne sont pas conçues pour être installées sur des véhicules lourds; les conditions étant beaucoup trop rudes (chocs, poussière, boue). Il serait tout de même intéressant d'étudier leur signal sonore et les phénomènes de propagation acoustique qui s'y rattachent, dans des conditions idéales, et d'adapter ces alarmes pour des conditions très rudes selon les résultats qui auront été obtenus.

Tableau 1
INVENTAIRE DES ALARMES DE REcul

Manufact.	Distrib.	Dim. (po)	Application	Niveau de bruit	Fréq. (Hz)	Type de signal	Respect norme	Modèle
DAP Electronics	DAP Electronics	5.25	Camions à benne Véhicules lourds et extra lourds	107 dB +- 4 à 4 pi	1000	modulation	SAE J 994 classe B	DAP 199
		5.25	Véhicules lourds et extra lourds et d'utilisation hors route	112 dB +- 4 à 4 pi	1000	pulsation	SAE J 994 classe A	DAP 112
NORDIPRO	NORDIPRO	6.5	Camions lourds	110 dB à 4 pi	1250			NORDIK- 80-A
Tonemaster electronics				87 dB ou 97 dB ou 102 dB			SAE J 994b	380
				107 dB			SAE J 994b	574
				87 dB ou 107 dB			SAE J 994b	574-2
Signaltone	Signaltone	4	Véhicules moyens Bruit ambiant moyen	112 dB	1300	60 bip/min	SAE J 994b	574-112
		4.875	Equipements légers de construction	97 dB à 4 pi	500	70 bip/min	SAE J 994 classe c	56000
Tomar		2.5		90 dB +- 5 à 4 pi (12V) ou 102 dB à 4 pi (36V)	2400	60 à 120 bip/min		625
		4.75		110 dB +- 4 à 4pi (12V-36V)	900- 1300	90 bip/min		600
		4.75		80dB à 110 dB (36V-72V)	900- 1300	90 bip/min		650

Tableau 1
INVENTAIRE DES ALARMES DE REcul (suite)

Manufact.	Distrib.	Dim. (po)	Application	Niveau de bruit	Fréq. (Hz)	Type de signal	Respect norme	Modèle
Tri-Lite	Tri-Lite			97 dB ou 107 dB ou 112 dB +-4 à 4 pi			Helps to comply OSHA....	ELA-3 TFA-2 CVA BKA LTA-2 FEA-1
Warrick Controls	Davis Controls	3.625 x 5	Non approprié pour chantiers	97 dB ou 107 dB +- 4 à 4 pi				CYBER BLAST-III
Design Tech	Design Tech Sears Auto ECCO		Automobiles Camions légers					
TMI	TMI			97dB ou 87 dB +- 4 à 4pi				LTA-2 TFA-2 BKA CVA
		6 po	s'installe sur les roues de véhicule	107 dB ou 97 dB +- 4 à 4pi			Mécanique (2 marteaux)	
		8 po	s'installe sur les roues de véhicules	96 dB +- 4 à 4 pi 101 dB +- 4 à 4 pi			Mécanique (4 marteaux)	

Tableau 1
INVENTAIRE DES ALARMES DE RECUL (suite)

Manufact.	Distrib.	Dim. (po)	Application	Niveau de bruit	Fréq. (Hz)	Type de signal	Respect norme	Modèle	
Southern vehicle products		4.5		102 dB		60 bip/min		BA-4	
		4		97 dB		60 bip/min		BA-5	
		2.25		97 dB		60 bip/min		BA-6	
		5		10 dB au-dessus du bruit ambiant				BA-7	
ECCC		6.5		87 dB à 112 dB	Low Freq. Tone		SAE J 994	SA914	
		7.5		97 dB à 112 dB			OSHA... Bureau of mines	SA920	
		5		87 dB à 112 dB				SA917	
		5		82 dB à 107 dB			s'ajuste à au moins 5 dB au-dessus du bruit ambiant	GSA "K-spec"	SA907
		4.5		82 dB à 107 dB			pulsation		SA901
		4.3		87 dB à 112 dB			60 bip/min		SA940
		4.5		82 dB à 102 dB					SA931
		3.25		82 dB à 102 dB					SA950
		3.25		77 dB à 97 dB					SA951

Tableau 1
INVENTAIRE DES ALARMES DE REcul (suite)

Manufact.	Distrib.	Dim. (po)	Application	Niveau de bruit	Fréq. (Hz)	Type de signal	Respect norme	Modèle
E000	E000	6.3	Conditions très rudes et bruit ambiant élevé	112 dB +- 4		pulsation 60 bip/min	SAE classe A	876
		6.3	Véhicules lourds	112 dB ou 97 dB			classe A ou C	872
		5	Équipements de mines	112 dB			classe A	850
		5		112 dB ou 97 dB			classe A ou C	840
		5	Conditions moyennes et bruit ambiant moyen	107 dB			classe B	830
		5	Véhicules indus- triels	107 dB ou 87 dB			classe B ou D	820
		5		97 dB			classe C	810
		4.5	Conditions rudes et bruit moyen	107 dB			classe B	630
		4.5	Camions	97 dB			classe C	610
		6	Conditions rudes et bruit fort	112 dB			classe A	787
		6	Véhicules lourds	97 dB ou 112 dB			classe A ou C	767
		3.25	Conditions peu rudes	87 ou 97 ou 102 ou 107 dB			classe D ou B	série 500
			Camions légers					

Tableau 1
INVENTAIRE DES ALARMES DE REcul (suite)

Manufact.	Distrib.	Dim. (po)	Application	Niveau de bruit	Fréq. (Hz)	Type de signal	Respect norme	Modèle
ECCO	ECCO	4.3	Se monte dans la lumière arrière d'un véhicule	87 dB à 112 dB		s'ajuste à au moins 5 dB au-dessus du bruit ambiant		SA940
				112 dB			classe A	450
				107 dB			classe B	430
				97 dB			classe C	410
ECCO	Direct Safety Company	3.25	???			alternate sounds (?)		DF530 DF630 TF630
		4.5						
ECCO	Direct Safety Company	3.25		102 dB		80 bip/min	SAE classe C	DEL621-0001 DEL626-0001
		5	Conditions moyennes	107dB +/- 4 à 4pi				idem à Tri-Lite
Tri-Lite	Indus-Tool							
KLAXON	KLAXON		Engins de manutention de chantier	92 dBA +/- 3 à 2m (12V) ou 101 dBA +/- 4 à 2m (24V)	2600	bip-bip		93509Y
			Tous véhicules de chantier	92 dBA +/- 2 à 2m (12V)	1000	bip-bip		93505Y 93506Y
		4	Bruit ambiant moyen Camions et véhicules utilitaires légers	92 dBA +/- 2 à 2m (24V)	1300	60 bip/min	SAE J 944b classe C	56000
		4.875		97 dB à 4 pi	500	70 bip/min	SAE J 944b classe C	81060

Tableau 1
INVENTAIRE DES ALARMES DE RECUL (suite)

Manufact.	Distrib.	Dim. (po)	Application	Niveau de bruit	Fréq. (Hz)	Type de signal	Respect norme	Modèle
Switchtec Electronics			Sécurité équip. industriels	104 dB à 1m	2400-2850	continue ou pulsé		SG-04-428 SH-04-428
Oakwoall Electronics Security Systems		3.5		90 dBA à 1m (12V-24V)	300-2800	voix humaine synthétisée		Big Mouth Junior
		4.5		115 dBA disponible			Big Mouth Senior	
		4.5		115 dBA disponible			Big Mouth Major	
Curtis		4	Équipements de construction	97 dB +/- 4	1350	80 pulse/min	SAE J 994	AA 483-095
		4		87 dB +/- 4	1350	80 pulse/min	SAE J 994	AA 483-096
		5		82 dB à 107 dB	1100	80 pulse/min	SAE J 994	AA 483-097
Tomas Electronics Marco			Anti-collision pour camions					RAC-02
Majima Company		4.5		112 dB (12V-24V)	410	pulsation		Alta potenza high power
		2.36	Conditions rudes Camions lourds et Equipements de construction	112 dB à 4pi (12V-24V)		80 pulse/min	SAE J 994	BUA-10
	107 dB (12V-24V)							-112-12
			Chariot élévateur	97 dB (12V-24V)				
				87 dB (12V-24V)				

2.4 Recherche bibliographique

Une recherche informatisée dans les banques de données disponibles au Conseil national de recherches Canada (CNRC) a été effectuée par le CCIL. Les fichiers suivants ont été consultés:

INSPEC	1970-présent
SAEG	1980-présent
PTS PROMT	1980-présent
Safety	1981-présent

Le centre de documentation de l'ASP construction a également effectué une recherche informatisée pour tenter de répertorier les accidents dus au recul de véhicules lourds. Les résumés des articles jugés les plus pertinents dans le cadre de la présente étude sont présentés ci-après. Certains articles n'étaient malheureusement pas disponibles en français ou en anglais.

Dans l'article de Laroche et al. (1991), la problématique des phénomènes d'interférence acoustique est abordée ainsi que la remise en question de la réglementation québécoise sur les alarmes de recul. L'auteure conclut en mentionnant la nécessité de poursuivre des recherches dans ce domaine afin de munir les véhicules lourds de systèmes sécuritaires.

Plusieurs articles soulèvent le manque de visibilité à l'arrière des véhicules lourds (INRS, 1992; CSST, 1988; Construction Safety Association of Ontario, 1991; Boillot et al., 1989; INRS, 1990). Les auteurs suggèrent d'améliorer l'organisation du travail et de positionner des signaleurs pour diriger le mouvement des véhicules. Pour certaines applications, l'utilisation de caméras vidéo est recommandée. Selon certains auteurs, le montage technique n'est pas encore au point (la lentille est rapidement obstruée par la poussière ou la boue).

Les détecteurs d'obstacle sont brièvement abordés dans certains articles, de même que les paniers de recueil (INRS, 1992; 1990; Scheiderman, 1990; Saez, 1983; Honda & Ohtsuki, 1984). Ces derniers sont placés derrière ou devant les véhicules et permettent d'éviter l'écrasement des piétons par les roues en les recueillant. Ces systèmes ne peuvent être envisagés que pour des véhicules lents et circulant sur une surface plane (ex: rouleau compacteur). Quant aux détecteurs d'obstacles, ils ne peuvent être utilisés que dans quelques applications spécifiques. La technologie n'est pas suffisamment avancée pour être utilisée de façon générale. Par exemple, la fiabilité de ces systèmes n'est pas encore au point (ex.: discrimination entre un obstacle fixe déjà détecté et un piéton passant à l'arrière du véhicule).

Duchon et Laage (1986) basent leur article davantage sur des considérations logiques que sur une recherche concrète. Néanmoins, les différents points abordés dans cet article méritent une attention.

Tout d'abord, les auteurs présentent des statistiques sur les accidents survenus dans les mines de surface et impliquant des chargeuses sur roues. Certains accidents ont impliqué des travailleurs circulant à pied près d'une chargeuse. Compte tenu de la forme de ces chargeuses, la visibilité à l'arrière du véhicule est extrêmement limitée. C'est pour cette raison que des alarmes de recul automatiques sont utilisées sur ce type de véhicule.

Les auteurs s'interrogent ensuite sur les raisons qui font que ces alarmes ne remplissent pas toujours leur rôle de prévention des accidents. Trois raisons sont présentées:

- 1- Les alarmes sont installées de telle sorte qu'elles avertissent que le véhicule fait marche arrière. Il appartient donc au travailleur à pied de réagir au signal d'alarme. Ce type d'alarme tend à mettre la responsabilité sur le travailleur à pied de se retirer de la zone de danger. Alors que l'opérateur tend à ignorer cette alarme qui le dé-responsabilise.

2- Il existe un phénomène d'habituation auditive. Dès qu'une chargeuse fait marche arrière, le signal d'alarme se déclenche. Très souvent, le travailleur à pied entend ce signal sans qu'il soit dans la zone de danger. Le travailleur s'habitue à cette situation et n'identifie plus ce signal comme étant un avertissement de danger.

3- Finalement, la prédominance du bruit émis par les alarmes de recul, augmente le niveau de pollution sonore dans l'environnement de travail. Des opérations sur de longues périodes de temps en milieux bruyants entraînent une diminution de la performance et de la sécurité due à l'augmentation de la fatigue.

Les auteurs conseillent d'utiliser des systèmes d'alarme qui déclencheraient un signal sonore uniquement en présence d'un obstacle à l'arrière des chargeuses. L'alarme serait audible à l'extérieur des chargeuses et à l'intérieur des cabines. L'alarme serait activée par un détecteur d'obstacles à infra-rouge, à ultra-sons ou par un radar à effet Doppler.

La responsabilité d'éviter le danger serait partagée par les travailleurs à pied et les opérateurs. Lorsqu'une collision serait imminente, les deux parties répondraient au signal d'alarme. Par ailleurs, l'habituation auditive ne poserait plus de problème étant donné que l'alarme ne se déclencherait qu'en cas de danger de collision. Finalement, la pollution sonore causée par les alarmes serait nettement réduite puisqu'elles se déclencheraient moins fréquemment.

Toutes ces considérations sont pertinentes et font ressortir la problématique qui entoure les alarmes de recul. La recommandation d'utiliser des alarmes de recul couplées à des détecteurs d'obstacles est très intéressante. Il faut toutefois noter que la technologie de ces détecteurs n'est pas encore au point pour pouvoir être appliquée dans les conditions très rudes qui existent sur les chantiers de construction.

2.5 Inventaire des véhicules lourds impliqués dans des accidents de recul

2.5.1 Informations quantitatives

Les véhicules lourds impliqués dans des accidents de recul ont été répertoriés à partir des données disponibles dans les banques de données informatisées de la Commission de la Santé et de la Sécurité au Travail (CSST). Il s'agit de la seule source d'information objective, puisque l'information obtenue provient de rapports écrits suite à une enquête menée par des inspecteurs de la CSST.

Plusieurs accidents surviennent chaque année sur les chantiers de construction et les accidents mortels sont systématiquement enquêtés par la CSST. Les rapports sont éventuellement entrés dans les banques de données informatisées de la CSST sous forme de mots-clés. Ceux-ci n'identifient pas nécessairement s'il s'agit d'un accident impliquant le recul d'un véhicule ou encore si un des agents causal est la non-détection de l'alarme de recul. Autrement dit, il n'est pas possible à ce jour d'effectuer un inventaire exhaustif des véhicules lourds impliqués dans les accidents de recul et dus à la non-détection des alarmes de recul ou à l'inexistence de telles alarmes.

Une première recherche informatisée avait été effectuée dans le cadre d'une étude préliminaire sur les alarmes de recul intitulée "Conception et validation d'un modèle informatisé de détection de signaux sonores de danger en milieux de travail bruyants (Laroche et al. 1990)". Vingt-deux cas d'accidents reliés au recul de véhicules lourds et dus à la non-détection des alarmes de recul ou à l'inexistence de telles alarmes avaient été répertoriés. Parmi ces cas d'accidents, douze sont survenus sur des chantiers de construction.

Une deuxième recherche informatisée a récemment été effectuée pour tenter de répertorier davantage de cas d'accidents survenus sur des chantiers de construction. Trois cas supplémentaires ont alors été trouvés.

Le tableau 2 présente les cas d'accidents mortels survenus sur des chantiers de construction et dont un des agents causal a été identifié comme étant la non-détection de l'alarme de recul ou encore l'absence de signalement du recul. Il ressort clairement du tableau 2 que les camions sont les véhicules qui sont le plus souvent impliqués dans le type d'accidents étudiés. Parmi les quinze accidents répertoriés, seulement une chargeuse et une bétonnière ont été impliquées. Des camions ont été impliqués dans les treize autres accidents.

Dans certains cas, le rapport d'enquête spécifie que le bruit ambiant était supérieur au bruit émis par l'alarme lors de l'accident. Pour en arriver à cette conclusion, des mesures de niveaux de bruit ont été effectuées. Malheureusement, les mesures sont plus ou moins bien détaillées et il est impossible de savoir s'il existait ou non des patrons d'interférence acoustique aux endroits où se sont fait frapper les travailleurs. Il s'agit d'une question extrêmement importante car si certaines des victimes se trouvaient dans une zone de forte atténuation sonore (alarme très peu audible) au moment de l'accident, on peut supposer qu'un champ sonore plus uniforme à l'arrière des véhicules aurait permis de sauver des vies.

Pour certains autres cas d'accidents, le rapport d'enquête indique qu'il s'agissait d'un mauvais jugement de la part de la victime. Dans ces cas, on peut se demander si une alarme de recul adéquate (audible, champ sonore uniforme et directivité axée vers l'arrière), aurait permis d'éviter ces collisions.

Tableau 2
VÉHICULES LOURDS IMPLIQUÉS DANS DES ACCIDENTS MORTELS DUS AU REcul
SUR DES CHANTIERS DE CONSTRUCTION

Date de l'accident	Véhicule lourd impliqué	Commentaires
91-08-29	Camion remorque	Bruit > alarme
88-04-28	Camion à benne	Mauvaise synchronisation des actions
87-09-04	Camion à benne 10 roues	Non-détection de l'alarme de recul Alarme > bruit de 3dBA
87-07-01	Camion à benne Kenworth 74 10 roues	Non-détection de l'alarme de recul Alarme à l'avant des 2 essieux arrière et orientée vers la gauche: alarme 80-85 dBA bruit 105-107 dBA
87-01-09	Camion à benne 10 roues	Mauvais jugement Alarme > bruit
85-08-15	Camion 5 tonnes	Bruit > alarme de 17dBA
82-10-06	Camion Mack 76 à benne 10 roues, chargé (28800 kg)	Mauvais jugement Bruit > ou = alarme
82-09-17	Camion à benne 10 roues	Alarme ne fonctionnait pas Bruit ambiant très élevé
82-01-20	Bétonnière chargée (82 000 kg)	Non-détection de l'alarme de recul Bruit > alarme

Tableau 2
VÉHICULES LOURDS IMPLIQUÉS DANS DES ACCIDENTS MORTELS DUS AU REcul
SUR DES CHANTIERS DE CONSTRUCTION (suite)

Date de l'accident	Véhicule lourd impliqué	Commentaires
81-08-10	Chargeuse	Lacunes dans méthode de travail Pas d'alarme de recul
78-08-21	Camion à benne Ford 8000, 10 roues	Non-détection de l'alarme de recul Bruit > alarme
75-08-14	Camion-remorque de type plate-forme	Pas d'alarme de recul
75-07-08	Camion à benne Ford, 7 tonnes	Alarme ne fonctionnait pas? Bruit ambiant élevé
75-03-18	Camion à benne	Pas d'alarme de recul Bruit ambiant élevé
75-03-12	Chargeuse 2.5 tonnes	Non-détection du bruit de la chargeuse: Bruit ambiant élevé

2.5.2 Informations qualitatives

Dans le cadre du présent mandat, nous avons communiqué avec de nombreuses personnes susceptibles de nous fournir de l'information concernant les types de véhicules lourds le plus souvent impliqués dans des accidents de recul. Le type d'informations recueillies est à caractère qualitatif mais n'en demeure pas moins intéressant compte tenu de l'expérience des personnes consultées. Entre autres, nous avons communiqué avec des représentants patronaux et syndicaux, l'ASP construction, le centre de documentation de l'ASP construction, des inspecteurs de la CSST et des agents d'information de la CSST. Lors des entrevues téléphoniques avec ces personnes, nous leur expliquons l'objet et les objectifs de notre travail:

Objet: Réaliser un inventaire des véhicules lourds impliqués dans des accidents de recul sur les chantiers de construction.

- Objectifs:**
- 1-Effectuer des mesures de bruit à l'arrière des véhicules lourds impliqués le plus souvent dans des accidents de recul, avec différents types d'alarme, positionnées à différents endroits sur les véhicules
 - 2-Optimiser le champ sonore à l'arrière du véhicule en modélisant la propagation sonore du signal d'alarme selon la position de l'alarme sur le véhicule
 - 3-Prévenir les accidents dus au recul des véhicules lourds

Les questions suivantes ont été posées, selon les organismes consultés:

- Avez-vous des données ou des informations relatives aux accidents survenus sur les chantiers de construction et impliquant le recul de véhicules lourds?
- Selon votre expérience, quels sont les véhicules les plus souvent impliqués dans des accidents de recul?
- Avez-vous déjà entendu parler de cas d'accidents impliquant le recul de véhicules lourds? Si oui, pouvez-vous nous donner des détails relatifs à ces accidents?
- Quelles sont vos impressions concernant les alarmes de recul utilisées sur les véhicules lourds (réglementation actuelle, nécessité d'agir sur les alarmes, pertinence de notre projet, généralités)?

Les réponses à nos questions dépendent inévitablement de l'expérience personnelle des personnes interrogées. Néanmoins, ces informations, mêmes si elles n'ont pas l'objectivité des cas d'accidents répertoriés dans les banques de données informatisées, sont précieuses puisqu'elles sont le fruit de l'expérience et de faits non-officiels.

Bilan des discussions

Entrepreneur

Nous avons visité au courant du mois de mai 1992 un chantier de construction (réfection d'une rue résidentielle). L'entrepreneur responsable de ce chantier nous a été référé par l'AECQ car un des employés avait été gravement blessé lorsqu'il avait été frappé, il y a quatre ans, par un camion lourd qui reculait.

Une discussion avec l'un des propriétaires de cette entreprise en construction nous a permis de connaître les circonstances de cet accident grave mais non mortel. La victime marchait de dos au camion

lourd qui reculait. Une pelle mécanique à proximité travaillait et par le fait même émettait du bruit. La victime qui n'aurait pas entendu le camion (ni l'alarme sonore), a été violemment frappée par derrière et est tombée au sol. Elle a heureusement eu le réflexe de rouler sur le côté et d'éviter l'écrasement par les roues arrières mais la roue avant lui a écrasé une épaule. La victime a subi de multiples fractures et contusions. Il est à noter que cet accident n'a pas été répertorié lors de la recherche informatisée.

Un jeune ingénieur responsable de l'inspection des travaux était présent lors de cette discussion. Lui-même a été victime d'un accident semblable au cours des dernières années. Il prenait des notes, immobile, sachant qu'un camion reculait "au loin". Il a nettement sous-estimé la distance le séparant du camion. Il a été frappé dans le dos et les circonstances lui ont permis de rouler sur le côté et d'échapper à la mort mais il a dû s'absenter du travail pendant plusieurs semaines. Cet accident n'a pas été répertorié lors de la recherche informatisée.

Le propriétaire et le jeune ingénieur sont tous deux d'avis que les alarmes de recul sont nécessaires sur les chantiers. Ils croient qu'il y a un phénomène d'habituation auditive (documenté au chapitre 7) mais qu'inconsciemment les alarmes sonores leurs permettent de conserver la notion des mouvements des véhicules lourds circulant à proximité. De plus, ils préfèrent que les véhicules soient équipés d'alarmes de recul ayant des caractéristiques acoustiques différentes. Cela leur permet de distinguer les véhicules et de conserver un repère sur leur zone d'opération tout en poursuivant leurs tâches. Par exemple, le changement de zone d'opération d'une chargeuse sera immédiatement perçu si son signal d'alarme sonore lui est propre.

Inspecteurs de la CSST

Les inspecteurs de la CSST sont souvent sur le site des chantiers de construction et sont appelés à enquêter sur des accidents de travail.

De façon globale, les points suivants sont ressortis des propos des inspecteurs:

- Les camions à benne semi-remorque posent un problème car l'alarme est installée sur le tracteur et non sur la benne. Lorsque la benne (remorque) est en place, l'alarme est moins audible.
- Les camions qui proviennent de l'extérieur du chantier (ex.: camion qui effectue la livraison du bois) et qui n'ont pas de rayon d'action déterminé sont potentiellement plus dangereux que les véhicules assignés au chantier et qui ont un rayon d'action connu et peu variable. Les conducteurs qui proviennent de l'extérieur sont souvent pressés. Ils reculent où ils peuvent et déchargent rapidement leur contenu dans le but de repartir le plus rapidement possible.
- Phénomènes d'habituation auditive aux signaux sonores des alarmes de recul. Les travailleurs sont inondés de bruits d'alarmes de recul et finissent par ne plus y porter attention.
- Erreurs de jugement de la part des conducteurs qui ne respectent pas les indications des signaleurs ou erreurs de jugement des victimes qui circulent très près des camions en mouvement.
- Lacunes dans la réglementation sur les alarmes de recul. La réglementation devrait préciser les niveaux de bruit qui doivent être perçus à l'arrière des véhicules. Actuellement, la réglementation au Québec exige que les alarmes fournies par les manufacturiers respectent la norme SAE J994 qui spécifie que le niveau de bruit des alarmes doit être mesuré en champ libre, à une distance donnée. Toutefois, ces niveaux ne sont plus les mêmes lorsque les alarmes sont mises en place sur les véhicules. Ils sont souvent inférieurs aux niveaux indiqués par les manufacturiers.
- La réglementation devrait également obliger l'installation d'alarmes de recul sur les rétro-excavatrices.

Représentants patronaux

Monsieur Robert Cyr de l'AECQ, nous a mis en contact avec deux entreprises où il y a eu des accidents mortels dus au recul de camions lourds. Les véhicules impliqués dans ces accidents étaient des camions à benne. Dans tous les cas, il s'agissait de travaux de réfection de routes.

Nous avons visité un chantier de l'une de ces entreprises au courant du mois de mai 1992. Le compte rendu de cette visite a déjà été résumé à la section rapportant les propos d'un entrepreneur. Par ailleurs, cette visite nous a permis de constater qu'il y a davantage d'accidents dus au recul de véhicules lourds que ce qui a été répertorié dans les banques de données informatisées de la CSST.

Les deux entreprises seraient éventuellement très intéressées à collaborer à des mesures sur le terrain, en mettant à notre disposition des véhicules lourds.

Représentants syndicaux

Monsieur André Forest de la FTQ construction ainsi que messieurs Pierre Labelle et Jean-Marc Morin du Conseil Provincial ont été consultés. De ces conversations, il ressort que le type de véhicule le plus souvent impliqué dans les accidents de recul sont les camions.

La réglementation actuelle sur les alarmes de recul a été critiquée de façon virulente. Selon un des interlocuteurs, cette réglementation présente d'énormes lacunes qui mènent à des aberrations dans la pratique. Par exemple, une alarme peut respecter la norme SAE J994b-1985 mais être installée à un endroit sur le véhicule où elle sera pratiquement inaudible par un travailleur situé à l'arrière du véhicule. Le niveau de bruit perçu à l'arrière du véhicule devrait être légiféré.

ASP construction

Selon Monsieur Réal Lefebvre, les équipements les plus susceptibles d'être impliqués dans des accidents de recul sont tous les équipements qui sont appelés à circuler sur les chantiers de construction. Les camions viendraient en tête. Suivraient les béliers mécaniques, rouleaux compacteur, chargeuses sur pneus, chariots-élévateur, niveleuses, asphaltieuses.

M. Lefebvre nous a également référé au centre de documentation de l'ASP construction qui nous a transmis de la documentation sur le sujet qui nous préoccupe.

2.6 Synthèse

Les résultats de notre recherche montrent que les camions à benne et les camions remorque sont les véhicules lourds qui sont le plus souvent impliqués dans les accidents de recul survenant sur les chantiers de construction. En effet, parmi les 15 accidents répertoriés dans les banques de données informatisées de la CSST, 3 accidents impliquaient des chargeuses et une bétonnière, alors que 12 accidents impliquaient des camions lourds (voir tableau à la section 2.5.1). De plus, deux accidents supplémentaires impliquant des camions lourds ont été répertoriés lors d'une visite de chantier (voir section Entrepreneur).

Il est important de rappeler que l'inventaire effectué n'est pas exhaustif car les accidents dus au recul de véhicules lourds et dus à la non-détection des alarmes de recul ne sont pas toujours codifiés comme tel dans les banques de données informatisées de la CSST. Une visite de chantier nous a d'ailleurs permis de constater qu'il survient des accidents non-mortels dus au recul de véhicules lourds, qui n'ont pas pu être répertoriés lors de la recherche informatisée et qui ont entraîné la perte de plusieurs journées de travail.

Malgré les phénomènes d'habituation auditive décrits plus en détails à la section 3.0, les discussions font clairement ressortir que les alarmes de recul sont nécessaires. Elles permettent de conserver, dans une certaine mesure, la notion des mouvements des véhicules lourds autour des travailleurs et de les prévenir du danger qui existe durant les manoeuvres de recul. Jumelés à des détecteurs d'obstacles adéquats, les alarmes de recul seraient probablement davantage efficaces. La problématique des détecteurs d'obstacles dépasse le mandat qui a été confié à Sonométric Inc.

3.0 PHÉNOMÈNE D'HABITUATION AUDITIVE

3.1 Introduction

Les dernières années ont été témoins d'importants développements dans le domaine de la compréhension de la perception des avertisseurs sonores dont les alarmes de recul dans les milieux de travail. Les modèles les plus à jour dans ce domaine prennent aujourd'hui en considération une pléiade de facteurs psychoacoustiques, tels le contenu fréquentiel et le niveau de pression acoustique du bruit de fond et du signal sonore et l'état de l'audition des travailleurs étant exposés à ces stimuli sonores (Laroche et al, 1990).

La prochaine étape dans la prévention des accidents impliquant des alarmes de recul est donc la compréhension des phénomènes acoustiques derrière les véhicules lourds. Les expérimentations sur le terrain portant sur les avertisseurs sonores en général nous ont dévoilé que même lorsque que tous les paramètres psychoacoustiques indiquent que les avertisseurs sonores "devraient" être perçus, certains travailleurs ne répondent toujours pas suite à l'émission de ceux-ci (Hétu et al, 1991).

Il semble donc que le facteur humain soit déterminant dans la problématique de la perception des avertisseurs sonores en milieu de travail. Ce facteur humain prend, dans ce cas-ci, la forme d'une "désensibilisation" à l'influx auditif que représente le signal sonore. En psychologie moderne on réfère à cette "désensibilisation" comme étant de l'habituation (... "auditive", dans le cas qui nous intéresse ici).

Malheureusement, la recherche dans ce domaine de la perception auditive est encore embryonnaire. La très grande majorité des résultats portant sur ce sujet émane des études de vigilance, et opérationnalise l'habituation en quantifiant la latence des temps de réponse à une tâche spécifique. Ce parallèle entre la latence de réponse et l'habituation est imparfait mais représente à ce jour la meilleure approximation de l'installation et du maintien du phénomène d'habituation.

En fait, une vision plus large du phénomène d'habituation auditive des avertisseurs sonores passent nécessairement par la compréhension de modèles conceptuels de perception de signaux sonores et d'attention sélective.

Nous introduirons donc la problématique de l'habituation auditive en résumant brièvement le modèle de la perception d'avertisseurs sonores de Wilkins (1981). Nous serons ainsi en mesure d'évaluer lors de quelle étape de cette perception le phénomène d'habituation prend racine. Enfin, nous ferons une brève revue des principaux paramètres acoustiques ayant fait l'objet d'études sur l'habituation auditive.

3.2 Modèle conceptuel de Wilkins (La perception d'avertisseurs sonores)

S'il veut être efficace, un signal sonore indiquant qu'une action doit être entreprise doit rencontrer trois conditions: être audible, solliciter l'attention et être reconnu parmi d'autres avertisseurs (Wilkins, 1981).

3.2.1 Audibilité

Tout d'abord, il doit être audible: c'est-à-dire qu'il doit pouvoir être perçu et ce en dépit des bruits potentiellement masquant lui faisant compétition. Il est généralement accepté qu'un son, tel un

avertisseur sonore, peut être perçu si son niveau de pression acoustique excède celui du bruit masquant dans au moins une bande de tiers d'octave (Patterson, 1982). Une bande tiers d'octave représente une approximation raisonnable de la largeur d'une bande critique de l'oreille humaine pour les fréquences comprises entre 500Hz et 10000 Hz.

3.2.2 Sollicitation de l'attention

De plus, le signal sonore doit solliciter l'attention. Cette condition est spécialement importante dans le cas des avertisseurs sonores, car ceux-ci sont le plus souvent utilisés dans un contexte où une tâche est exécutée parallèlement à l'émission du signal sonore. Ainsi, une personne qui exécute une tâche primaire verra son attention focalisée vers celle-ci et l'attention requise pour être à l'affût d'un stimulus inattendu se verra d'autant diminué (Kahneman, 1973). C'est pour cette raison que différents auteurs (Wilkins et Martin, 1981, Héту et al 1991) ont suggéré que le ratio signal/seuil masqué du bruit soit au moins +12 dB dans au moins une bande de tiers d'octave dans de telles situations.

3.2.3 Reconnaissance

Finalement, le signal sonore doit être reconnu des autres bruits non-significatifs comme étant un stimulus porteur de message. Les deux éléments déterminants de cette dimension sont la qualité du signal (le contenu fréquentiel et les caractéristiques temporelles) et les capacités mnésiques de l'individu. Le contenu fréquentiel du signal doit ainsi se démarquer fréquemment de celui du bruit. C'est-à-dire que certains éléments fréquents du signal doivent être propres à celui-ci. De plus, le nombre de signaux ne doit pas dépasser les capacités généralement reconnues de la mémoire à court terme, c'est-à-dire 7 items distinctifs (plus ou moins deux) (Miller, 1956). Patterson et Milroy (1980) ont trouvé que leurs sujets pouvaient apprendre à discriminer jusqu'à 10 sons différents appelant une action. Toutefois, seulement six de ses dix sons pouvaient être correctement identifiés une semaine plus tard.

En résumé, un son qui est audible, qui attire l'attention et qui est reconnu des autres bruits non-significatifs devrait invariablement amener une réponse appropriée. Pourtant d'innombrables évidences anecdotiques nous démontrent que tel n'est pas toujours le cas. Il semble, en effet, que tout individu étant exposé régulièrement et répétitivement à une multitude de stimuli sonores vient à "ignorer" ceux-ci et leurs conséquences.

Plusieurs ouvriers impliqués dans des accidents reliés à l'absence de réponse appropriée à un avertisseur sonore relatent souvent qu'ils "n'entendaient plus" l'avertisseur, qu'ils étaient trop concentrés sur leur tâche pour porter attention ou qu'ils avaient sous-estimé les paramètres spatiaux et temporels associés à l'avertisseur sonore (Wilkins et Acton, 1982).

Ces réponses nous renvoient à la deuxième condition nécessaire à l'efficacité d'un son demandant une réponse, la demande d'attention. Il semble que le ratio du critère psychoacoustique de +12 dB ne soit pas une garantie absolue de sollicitation de l'attention. L'habitation à un stimuli sonore semble être une variable importante dans la dimension de la demande d'attention. L'habitation est généralement définie comme étant "la tendance à ignorer ou à donner moins d'importance à un stimulus lorsque celui-ci devient familier" (Best, 1986).

Ainsi nous réalisons que le phénomène d'habitation et l'attention sont intimement reliés. En fait, il ne s'agit pas uniquement de l'attention, mais plutôt de sa "sélectivité", c'est-à-dire de la capacité de pouvoir mentalement passer d'une tâche à une autre. Cette capacité de mener plus d'une tâche à la fois, par exemple scier du bois tout en étant attentif à la bétonnière qui recule non-loin, nous indique que nous sommes capable de maintenir plus qu'un focus d'activité mentale simultanément. Le focus de l'activité mentale est donc sélectif, variable et peut être divisé en sous-parties.

3.4 Variables de l'habituation au niveau de l'audition

Nous ferons ici la revue des principaux paramètres ayant été identifiés comme ayant une influence sur le phénomène d'habituation au niveau auditif. Nous étudierons les paramètres acoustiques de signaux sonores tels l'amplitude, la fréquence du signal, le rythme de présentation du stimulus et le patron temporel des stimuli.

3.4.1 Amplitude

Plusieurs travaux ont porté sur la relation qui pouvait exister entre l'amplitude d'un signal sonore et la variation des temps de réaction à ces signaux (Lisper et al, 1972, Lisper et al, 1973). Nous considérons l'élévation de la latence du temps de réponses comme un indice important d'habituation bien que formellement un temps élevé de réaction ne puisse être considéré comme de l'habituation telle qu'elle fut définie préalablement.

Les travaux de Lisper (1972) sur l'influence que pouvait avoir l'amplitude d'un signal sur la latence de réaction en sont venus à deux conclusions. Premièrement, il semble qu'en laboratoire, il existe une augmentation constante de la latence de réaction qui semble tout à fait indépendante de l'amplitude du signal. En fait, il semblerait que cette première augmentation soit imputable à la longueur même de la session expérimentale. Ainsi, plus la session était longue et plus les expérimentateurs observaient une augmentation des temps de latence des réactions des sujets suite à la présentation d'un signal sonore.

L'autre augmentation de la latence des réactions semblait toutefois corrélée avec l'amplitude du signal. Le maximum de latence se situe au seuil du signal sonore. Il semble donc que plus l'amplitude du signal sonore est faible et plus l'habituation sera rapide et prononcée (Thompson et Spencer, 1966, Lisper, 1972).

Des études ont aussi porté sur l'apprentissage à différents niveaux de pression acoustique de bruit (Warner, 1969). Il semble qu'à court terme, l'amplitude d'un bruit (un bruit blanc dans ce cas) n'a aucune influence sur la performance à l'apprentissage d'une tâche. Toutefois, les auteurs ont noté que le même degré d'apprentissage ne pouvait se maintenir sur une aussi longue période dans des conditions bruyantes. Les auteurs suggèrent que les bonnes performances dans des conditions "bruyantes" lors des débuts d'expérimentations pouvaient s'expliquer par le haut niveau d'activation provoqué par la présentation du bruit.

3.4.2 Fréquence du signal sonore

Peu d'études ont porté sur cette facette de l'habituation auditive. Franczuk (1973) a démontré qu'une bande de bruit centrée à 4000Hz provoquait une plus grande latence de réponses (0.02 seconde de plus) qu'une bande de bruit centrée à 250 ou 1000 Hz. Toutefois, l'auteur conclut que cette différence peut facilement être le fruit d'un phénomène étranger aux fréquences des signaux.

3.4.3 Rythme de présentation du stimulus

Lisper (1969) a tiré deux conclusions de ses expériences portant sur la relation entre le rythme de présentation et la latence de réaction à des tâches de vigilance. Tout d'abord, il semble que la latence des réactions augmente en fonction de la longueur de l'exposition aux stimuli. L'aspect intéressant de cette augmentation est qu'elle est plus prononcée lorsque le rythme de présentation est élevé. Ainsi à la longue, un rythme élevé de présentation de signaux sonores entraînera une augmentation plus importante des temps de réaction qu'une présentation à un rythme moins répétitif.

Dans une expérimentation subséquente, Lisper et ses associées (1973) ont ajouté une dimension supplémentaire au rythme de présentation des stimuli. Ceux-ci ont jumelé temporellement deux signaux sonores de façon à ce que le premier annonce la venue du deuxième. Le premier signal représentait le

signal "énonciatif" (prewarning signal) et le deuxième le signal "annoncé" (prewarned signal). Les résultats démontrèrent que le signal "énonciatif" avait une latence significativement plus longue que le signal "annoncé", et que l'augmentation de la latence avec le temps était aussi plus prononcée dans le cas du premier signal.

3.4.4 Patron temporel du stimulus

Un signal sonore que l'on veut reconnaissable peut gagner à posséder un patron temporel distinctif; mais jusqu'à quelles limites les paramètres acoustiques d'un signal peuvent-ils être manipulés sans susciter un phénomène d'habituation? Il semble que dans le cas de fréquences inférieures à 5000 Hz, des modulations de fréquence et d'amplitude peuvent être détectées, et ce parallèlement par des canaux fonctionnellement distincts (Gorea et al, 1986). Toutefois, cela n'est plus le cas lorsque les fréquences dépassent une certaine limite, dans le présent cas 1500 Hz.

Antis et Saida (1985) ont aussi rapporté que la probabilité d'entendre de la cohérence temporelle entre deux signaux distincts, c'est-à-dire d'entendre deux signaux distincts mais présentés de manière contiguë dans le temps, diminuait de façon constante. Ainsi deux signaux distincts auront tendance à être perçus comme un seul signal ininterrompu lorsqu'ils sont présentés de façon continue. Ce phénomène est généralement décrit comme étant de la "fission" ou de la "ségrégation de flot auditif" (Bregman, 1989). Il semble que cette adaptation soit spécifique à la fréquence testée et corresponde à la largeur d'une bande critique.

Deatherage (1972) recommande qu'un signal modulé servant à attirer l'attention devrait posséder une montée et une descente d'environ 1 à 3 cycles par seconde pour avoir une discrimination maximale.

3.5 Synthèse

Nous avons eu recours au modèle de Wilkins pour présenter le traitement séquentiel de l'information auditive afin que celle-ci puisse être intégrée comme étant porteuse d'un message quelconque. Nous en sommes venus à la conclusion que les trois paramètres essentiels d'un signal sonore, soit l'audibilité, la propriété de solliciter l'attention et la reconnaissance, n'étaient pas en soi une garantie de réponse adéquate des travailleurs.

Nous avons émis l'hypothèse que les phénomènes d'attention sélective et d'habituation étaient propre au deuxième stade du modèle conceptuel de Wilkins, soit la propriété d'attirer l'attention. Enfin, nous avons discuté de quelques variables acoustiques pouvant affecter l'habituation auditive. Si nous acceptons l'hypothèse que l'augmentation de la latence d'une réponse suite à un stimulus sonore est un indice d'habituation, nous pouvons conclure que :

- 1 - La durée d'une session d'exposition à des stimuli sonores est directement corrélée avec le potentiel d'habituation associé aux stimuli.
- 2 - L'amplitude d'un signal sonore est inversement corrélée avec son potentiel d'habituation.
- 3- La fréquence du signal sonore semble n'avoir que peu d'effet sur le potentiel d'habituation d'un signal sonore.
- 4- Le rythme de présentation de stimuli sonores est directement corrélé avec le potentiel d'habituation de celui-ci.
- 5- La modulation d'amplitude et de fréquence d'un signal sonore d'une fréquence inférieure à 5000 Hz semble diminuer son potentiel d'habituation.

La compréhension des phénomènes acoustiques derrière les véhicules lourds devra nécessairement tenir compte des phénomènes discutés ici. Ainsi, une alarme de recul efficace devra rencontrer les critères fixés par le modèle conceptuel de Wilkins. De plus, il devra prendre en considération les contraintes cognitives imposées par la tâche primaire ainsi que le degré d'activation inhérente à cette même tâche.

Enfin, pour éviter les phénomènes d'habituation auditive, une alarme de recul devra considérer et intégrer les conclusions discutées ci-haut, c'est-à-dire qu'elle se devra d'être assez forte, pas trop fréquente et devra comporter des modulations de fréquence et d'amplitude ne dépassant pas 3 cycles par seconde. De plus, le nombre d'alarmes présentées simultanément devra être limité afin d'éviter le phénomène de ségrégation de flots auditifs.

4.0 CONCLUSION DE LA PREMIÈRE PARTIE

Cette étude consistait à recueillir le maximum d'informations sur les six points suivants:

- a) Normes et réglementations relatives aux alarmes de recul dans divers pays
- b) Brevets sur des alarmes de recul
- c) Alarmes de recul disponibles dans divers pays
- d) Publications portant sur la problématique des alarmes de recul
- e) Véhicules lourds le plus souvent impliqués dans les accidents de recul sur les chantiers de construction
- f) Phénomènes d'habituation auditive

Parmi les règlements qui ont été répertoriés, plusieurs obligent l'utilisation d'alarmes de recul en tout temps lorsque la visibilité est réduite. Seuls la province de l'Alberta et l'état du Massachusetts spécifient que le niveau de bruit de l'alarme doit dépasser le niveau de bruit ambiant. Le règlement de l'Alberta est le seul à mentionner que le son émis par l'alarme ne doit pas être annulé par les harmoniques de l'engin à la grandeur de la zone d'opération de l'engin. Par contre, aucun règlement ne fait mention des phénomènes d'annulation d'ondes acoustique émises par l'alarme à l'arrière du véhicule. D'autre part, parmi les règlements répertoriés, seuls ceux de la province de Québec et de la France réfèrent à une norme.

Parmi les brevets qui ont été répertoriés, le brevet no. 4,603,317 est sans contredit le plus intéressant. En effet, le système d'alarme qui y est décrit utilise une technologie moderne qui permet d'ajuster le niveau de bruit de l'alarme au-dessus du niveau de bruit ambiant qui règne sur les chantiers. Toutefois, même si cette technologie augmente grandement les chances d'audibilité du signal d'alarme, elle ne la garantit pas. En effet, les phénomènes d'annulation d'ondes peuvent quand même se produire et créer ainsi des zones de forte atténuation acoustique à l'arrière du véhicule.

L'inventaire d'alarmes de recul a été fructueux (plus de dix-sept manufacturiers et près de soixante-dix modèles différents). La plupart des alarmes sont du même type: ton pulsé (bip-bip) ou modulé, fréquence pure ou rapprochée (1000 Hz) et niveau de bruit fixe. Un de ces types d'alarmes a toutefois la caractéristique d'ajuster constamment son niveau de bruit au-dessus du niveau de bruit environnant (le brevet no. 4,603,317, section 2.2, porte d'ailleurs sur un tel principe). D'autre part, plusieurs de ces alarmes respectent la norme américaine SAE J994 (voir section 2.2).

Certaines alarmes possèdent des signaux sonores complexes mais ne supporteraient pas les conditions rudes existant sur les chantiers. Il serait tout de même intéressant d'étudier leur signal sonore et les phénomènes de propagation acoustique qui s'y rattachent, dans des conditions idéales, et d'adapter ces alarmes selon les résultats qui auront été obtenus.

La recherche bibliographique a permis de trouver plusieurs articles qui traitent des détecteurs d'obstacles. Il s'effectue actuellement beaucoup de recherches sur ce sujet dans le secteur de

l'automobile. Les résultats ne sont malheureusement pas encore concluant et il faudra attendre encore quelques années pour qu'un produit fini soit disponible sur le marché. Cette technologie couplée à une alarme émettant un champ sonore uniforme à l'arrière des véhicules serait une solution fort prometteuse pour la prévention d'accidents de recul.

Selon l'inventaire effectué dans les banque de données de l'IRSST, les camions à benne et les camions remorque sont les véhicules lourds qui sont le plus souvent impliqués dans des accidents de recul. Toutefois, suite à des discussions avec différents intervenants, les rétro-excavatrices et tous les véhicules qui se déplacent sur un chantier (béliers mécaniques, niveleuses, etc.) sont potentiellement dangereux et méritent que l'on s'y attarde.

Finalement, pour éviter les phénomènes d'habituation auditive, une alarme de recul devra intégrer les conclusions discutées à la section 4.0, c'est-à-dire qu'elle devrait être suffisamment forte, pas trop fréquente et devrait comporter des modulations de fréquence et d'amplitude ne dépassant pas 3 cycles par seconde. De plus, le nombre d'alarmes présentées simultanément devrait être limité afin d'éviter le phénomène de ségrégation de flots auditifs.

Pour permettre qu'une alarme ne soit pas trop fréquente, elle devrait se déclencher uniquement en cas de danger d'une éventuelle collision. Les détecteurs d'obstacles permettraient ce déclenchement mais comme il a été mentionné plus haut, cette technologie n'est pas encore au point.

5.0 DEUXIÈME PARTIE: ESSAIS TERRAIN ET MISE AU POINT D'UN MODÈLE DE PROPAGATION SONORE

La plupart des accidents surviennent sur les chantiers de construction et pourraient être attribués à au moins quatre causes principales: 1) le taux de prévalence élevé de la surdité professionnelle dans le secteur de la construction, 2) les niveaux de bruit élevés sur certains chantiers 3) les caractéristiques acoustiques déficientes des alarmes de recul existantes et 4) l'emplacement non-adéquat de ces alarmes sur les véhicules lourds.

Les deux premiers aspects ont été largement documentés par les Départements de Santé Communautaire (Simpson, 1989). Tel que démontré dans la première partie de ce projet, très peu de travaux ont porté sur les deux derniers aspects. Afin de combler cette lacune, il devient donc important de mieux comprendre les phénomènes de propagation acoustique impliquant le recul des véhicules lourds. Les deux principaux objectifs de la deuxième partie du projet sont:

- 1) de procéder à des relevés de niveaux de pression acoustique émis par différentes alarmes de recul installées sur différents types de véhicules lourds, sur le terrain, afin de documenter la situation telle qu'elle se vit sur les chantiers de construction;
- 2) de développer un modèle informatisé qui permet de prédire le niveau de pression acoustique d'un signal sonore avertisseur de recul derrière les véhicules lourds de forme et de dimension variées qui sont le plus souvent impliqués dans les accidents mortels.

6.0 MÉTHODES

L'étude terrain a été menée sur différents véhicules lourds munis de différents types d'alarmes de recul et circulant sur les chantiers de construction québécois. Une courte expérimentation en laboratoire a précédé ces mesures terrain afin de définir les caractéristiques acoustiques intrinsèques aux alarmes de recul choisies.

6.1 Choix des véhicules lourds et des alarmes de recul

Le choix des véhicules lourds a été fait à partir de l'inventaire des véhicules lourds et des alarmes de recul utilisés fréquemment sur les chantiers de construction et présenté à la section 2.3. Les véhicules qui ont fait l'objet de mesures terrain ont été choisis à l'intérieur de grandes familles de véhicules (ex. camions, chargeuses, pelles) et présentaient différentes caractéristiques géométriques et des poids variables afin de représenter le plus fidèlement possible la réalité du secteur de la construction. Par ailleurs, le choix a été orienté vers les véhicules les plus susceptibles d'être impliqués dans des accidents reliés à la manoeuvre de recul. Quatre véhicules lourds ont été retenus. Il s'agit d'un camion à benne, d'une chargeuse, d'une niveleuse et d'une bétonnière.

Le choix des alarmes de recul a été guidé par l'inventaire présenté à la section 2.5. Cet inventaire, basé sur les données fournies par les fabricants, a permis d'identifier des alarmes qui se distinguent en terme de niveau de pression acoustique à une distance donnée (ex. 1 mètre), de contenu en fréquence et de caractéristiques temporelles (pulsé vs modulé).

6.2 Expérimentation en laboratoire

Avant d'opter pour les cinq alarmes testées sur le terrain, dix alarmes de recul ou avertisseurs sonores comparables aux alarmes de recul couramment rencontrés sur le terrain ont fait l'objet d'une expertise en laboratoire. Cette expertise avait pour but de vérifier les caractéristiques fournies par les fabricants. Des mesures de niveau de pression acoustique à une distance pré-déterminée (ISO 3744, 1981), de contenu spectral et de caractéristiques temporelles ont été menées en chambre semi-anéchoïque. La figure 1 présente la disposition des points de mesure proposés dans la norme ISO 3744.

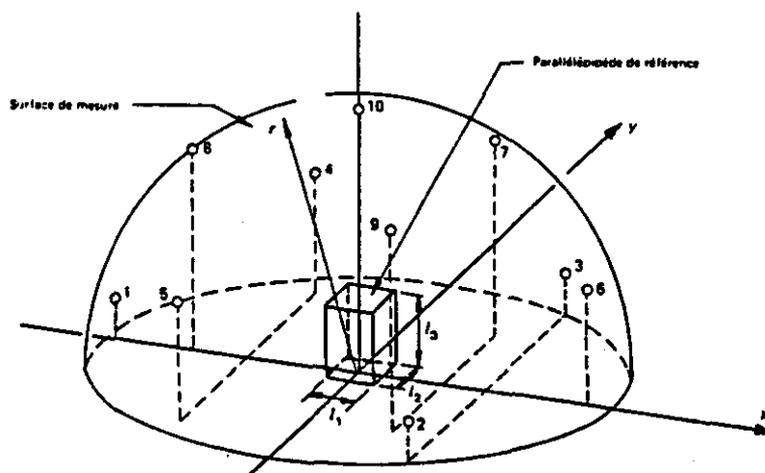


Figure 1 Disposition des points de mesure selon la norme ISO 3744.

Les mesures ont été faites à l'aide d'un système informatisé de mesures de bruit de classe 1 (CEI 804, 1985). Il s'agit d'un système basé sur une carte de traitement de signal bi-voie et de logiciels spécialisés installés sur un ordinateur portable de type PC-compatible (Toshiba T5200). Les logiciels dBARIATr, dBFET et dBSEUIL ont été utilisés. Sur la base des caractéristiques des 10 alarmes, cinq d'entre elles ont été sélectionnées pour l'étude terrain. Les données recueillies à cette étape ont aussi été utilisées lors de l'élaboration du logiciel de propagation sonore.

6.3 Mesures sur le terrain

6.3.1 Instruments

Des relevés de niveaux de pression acoustique des alarmes de recul ont été faits en différents points derrière les véhicules lourds à l'aide d'une enregistreuse numérique (DAT, TEAC DAP-20) à laquelle était branchée un contrôleur (Sonométrie) muni d'un microphone de type 1 (Cirrus, MK-224). Le contrôleur permettait d'emmagasiner des signaux de contrôle (calibrage, échantillonnage, pause) sur la deuxième voie du DAT. Ces signaux ont facilité le dépouillement des enregistrements audio-numériques recueillis sur le terrain. Le microphone était monté sur une perche afin de l'éloigner de la personne en charge des mesures. Cette précaution a été prise afin de minimiser les interférences des ondes sonores avec un obstacle tel que le corps humain.

6.3.2 Choix des sites de mesure

Le choix des sites de mesures a été fait avec l'aide des représentants de l'Association Paritaire, Secteur Construction et de l'Association des Entrepreneurs en Construction du Québec. Quatre sites ont été retenus. Il s'agit du siège social de Désourdy à St-Hubert (camion à benne), de la carrière Désourdy à St-Philippe de Laprairie (chargeuse), des Entreprises Michaudville à St-Bernard de Michaudville (niveleuse) et de la carrière Graybec à Boucherville (bétonnière).

Pour tous ces sites, il était important de s'assurer que le sol où se déroulaient les mesures soit comparable à ce que l'on retrouve sur un site de construction, à savoir un sol recouvert de gravier et de terre. Dans un premier temps, les véhicules lourds ont été situés de façon à éviter toutes réflexions des ondes sonores sur les bâtiments ou sur d'autres véhicules. Par ailleurs, tous les véhicules testés étaient immobiles lors des mesures. Dans un deuxième temps, quelques mesures ont été réalisées près d'un mur, afin d'observer les phénomènes de réflexion provenant d'un tel obstacle.

6.3.3 Conditions climatiques

Les mesures ont été menées entre les mois de juillet et octobre 1992 car 1) une très forte proportion des travaux de construction se concentre dans cette période et 2) les températures froides peuvent influencer le comportement des équipements de mesure. Les conditions atmosphériques telles que l'humidité, le gradient de vent, la température influencent peu la propagation du son sur de très courtes distances (Beranek, 1988). Dans cette étude, on pouvait négliger ces facteurs puisque les distances de mesure n'excédaient pas 4 mètres.

6.3.4 Déroulement des mesures

Les mesures ont d'abord été menées sur chacun des véhicules munis tour à tour des cinq alarmes retenues. Deux positions de l'alarme ont été étudiées. Ces positions variaient d'un véhicule à l'autre. L'Annexe I présente des croquis des différents emplacements. Le choix des emplacements a été basé sur ce qui est d'usage courant sur les véhicules lourds. D'autre part, quelques mesures ont été réalisées lorsque deux alarmes étaient installées sur le même véhicule et ont été mises en fonction simultanément afin d'analyser le patron de propagation sonore résultant.

Les mesures ont été faites selon plusieurs axes dessinés au sol, à l'aide de peinture fluorescente. La position des axes utilisée lors de l'étude exploratoire (Laroche et al., 1990) a été conservée pour chacun des véhicules. La figure 2 présente ces axes pour le camion à benne. L'expérimentateur se déplaçait à vitesse constante entre les axes et complétait chaque pourtour (soit à 1, 2 et 4 mètres) en deux minutes; 15 secondes s'écoulaient donc entre chaque axe. Un balayage selon l'axe 5, de 0 à 4 mètres, a été complété en 1 minute pour chacun des véhicules et chacune des alarmes. Dans certains cas (principalement pour la bétonnière), ce balayage débutait à 1 mètre du véhicule à cause de composantes qui empêchaient l'expérimentateur d'approcher la perche près de celui-ci (ex. goulotte de la bétonnière)

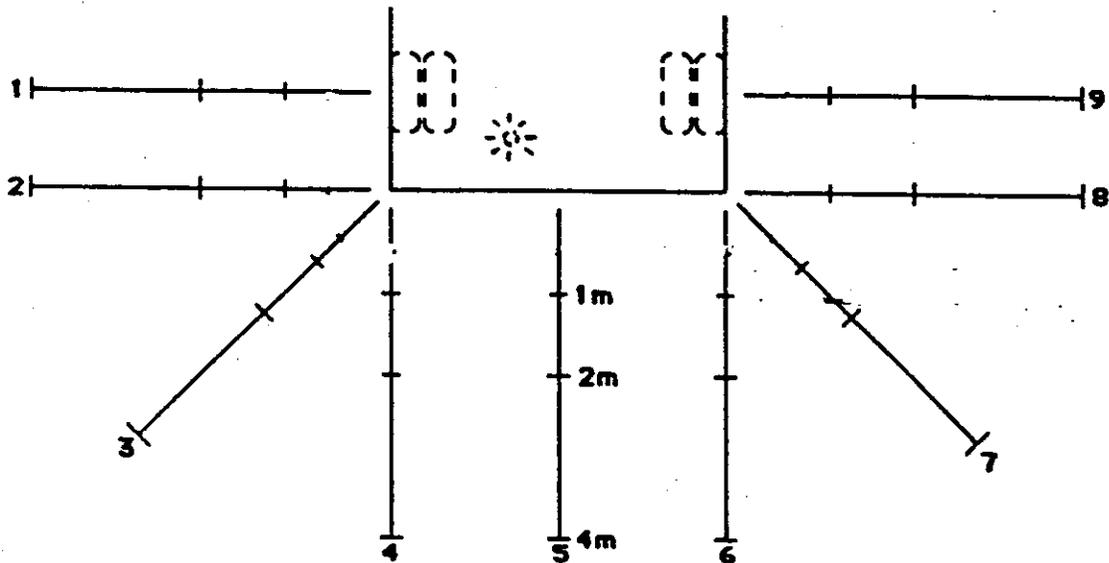


Figure 2 Position des axes de mesure derrière le camion à benne. Cette disposition a été conservée pour chacun des véhicules lourds.

6.4 Analyse des données

6.4.1 Mesures en laboratoire

Les niveaux de pression acoustique aux 10 points de mesure suggérés dans la norme ISO 3744, le niveau moyen et le contenu spectral ont été retenus pour l'analyse. La puissance acoustique de chacune des alarmes a été calculée selon la formule:

$$L_w = L_p + 10 \log S \quad \text{où } S = 2\pi R^2 \quad (R = 1 \text{ mètre}) \quad \text{où}$$

L_w = puissance acoustique
 L_p = niveau de pression acoustique moyen

Certaines mesures ont été reprises au point 10 afin de vérifier la constance des alarmes.

6.4.2 Mesures sur le terrain

Les données enregistrées sur rubans magnétiques à l'aide du contrôleur ont été dépouillées à l'aide des logiciels dBFETE et dBSEUIL. Ces logiciels permettent de procéder à des analyses de la variation du niveau de pression acoustique en fonction de la distance parcourue derrière chaque véhicule étudié, et ce pour chaque alarme de recul. Malgré les changements de vitesse incontrôlables (mais tout de même minimales), notre méthode de dépouillement a permis de bien illustrer les phénomènes de variation du niveau de pression acoustique. Deux à six échantillons par seconde étaient prélevés lors du dépouillement des cassettes à l'aide du logiciel. Entre deux points espacés de 15 secondes, nous disposons donc de 30 à 90 valeurs du niveau de pression acoustique.

Lors du dépouillement, les résultats obtenus entre les axes 3 à 7 ont été privilégiés puisque cette zone représente le plus grand risque d'accidents graves. Le pourtour situé à 1 mètre de l'arrière des véhicules a été principalement retenu pour l'analyse car cette distance correspond à une distance critique pour se retirer de l'arrière du véhicule sans se faire heurter. Aux autres distances (2 et 4 mètres), des patrons d'interférence ont été mis en évidence mais la vitesse de déplacement du véhicule (généralement basse) peut faire en sorte que le travailleur ait suffisamment de temps pour se retirer. Les mesures selon l'axe 5 ont aussi été analysées car cette localisation est directement au centre du véhicule et présente donc un danger accru de se faire heurter.

Pour quelques véhicules et quelques alarmes, les données ne sont pas disponibles soit à cause de difficultés de dépouillement (erreur dans le calibrage) ou, dans de rares cas, de données manquantes. Ces mesures n'ont pu être reprises à cause de conditions climatiques défavorables (principalement neige au sol). Le peu de données manquantes ne compromet en rien les conclusions que l'on peut tirer de l'ensemble des résultats.

Les niveaux de pression acoustique maximum et minimum enregistrés entre les axes 3 à 7 ont été retenus afin de mettre en évidence les écarts qui peuvent exister entre deux points de mesure et deux positions d'alarme sur un même véhicule. Chacun de ces niveaux est associé à un axe ou une distance (en mètre). Enfin, le décompte du nombre d'interférence entre les axes 3 à 7 a été associé à un symbole (de -- à ++) permettant d'identifier rapidement les conditions problématiques. Les symboles --, -, +-, +, ++ ont été associés respectivement à 0, 1-2, 3-4, 5-6, 7 interférences et plus. Une interférence est définie comme une variation de plus de 5 dB entre différents points de mesure juxtaposés.

6.5 Mise au point du modèle de propagation sonore

Les données terrain ainsi que les données recueillies en laboratoire ont permis de mettre au point un modèle de propagation des alarmes de recul en tenant compte des phénomènes de réflexion et de diffraction des ondes sonores. Plus précisément, la mise au point du modèle a nécessité:

a) l'identification des principaux trajets sonores existant entre le signal sonore de recul et le receveur ainsi que des phénomènes acoustiques associés, à savoir les réflexions et diffractions (simples ou doubles);

b) le développement d'un modèle de calcul du phénomène de la double diffraction (dans le cas des véhicules où ce phénomène se produit) en s'appuyant sur les résultats et les techniques de mesures développées lors d'études antérieures portant sur la diffraction (Nicolas et al., 1983; L'Espérance et al., 1989);

c) le développement d'un algorithme global permettant d'évaluer, en tout point derrière un véhicule donné, l'ensemble des paramètres géométriques et acoustiques nécessaires au calcul du niveau sonore total généré par une alarme de recul. Un premier modèle développé dans le cadre de l'étude exploratoire financée par l'IRSST (Laroche et al., 1990) a servi de base mais a été raffiné en tenant compte des nouveaux types d'alarmes de recul et de véhicules lourds impliqués.

Ce logiciel, tout comme celui développé dans l'étude exploratoire, s'appuie sur les mêmes principes de base concernant la propagation: seulement deux rayons sont considérés, un rayon direct et un rayon réfléchi. Mais dans ce nouveau logiciel ces deux rayons peuvent être diffractés, ce qui permet d'obtenir de meilleures prédictions près du véhicule (là où la diffraction est la plus importante).

Voici un rappel concernant la propagation sonore en présence d'un sol réfléchissant. Cette théorie ayant déjà été présentée dans l'étude exploratoire (Laroche et al., 1990), seuls les points importants sont repris:

1) la pression au receveur = pression onde directe + la pression onde réfléchie X coefficient de réflexion au sol

$$P(r) = A_1 \left(\frac{e^{jkr_1}}{r_1} + R_{sp} \frac{e^{jkr_2}}{r_2} \right)$$

où R_{sp} = coefficient de réflexion au sol

2) la réflexion au sol dépend du changement d'impédance (ou de milieu) air-sol et le modèle utilisé pour déterminer ce rapport d'impédance est celui de Delany et Bazley (1970). Ces auteurs ont défini le rapport d'impédance par :

$$\frac{Z}{Z_0} = \left[1 + 9.08 \left(\frac{f}{\sigma} \right)^{-0.75} + i 11.9 \left(\frac{f}{\sigma} \right)^{0.73} \right]$$

Voici maintenant la théorie utilisée pour la diffraction. Une diffraction se produit lorsqu'un rayon doit contourner un obstacle pour se rendre au receveur. Contourner un obstacle entraîne deux choses pour un rayon: son parcours est plus long et il subit une diffraction (figure 3). Toutes deux ont la même conséquence: elles diminuent l'amplitude du rayon qui est diffracté.

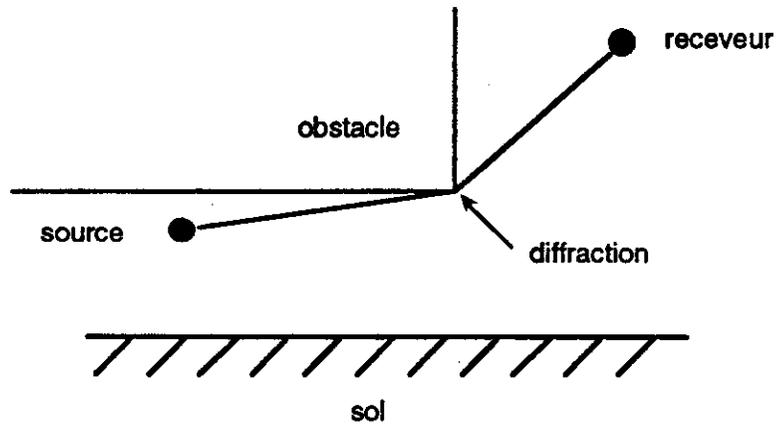


Figure 3 Définition de la diffraction.

Le coefficient de diffraction, \emptyset_{dif} , dépend de plusieurs paramètres dont l'angle entre le receveur et l'obstacle et l'angle entre la source et l'obstacle. Ces angles sont définis à la figure 4.

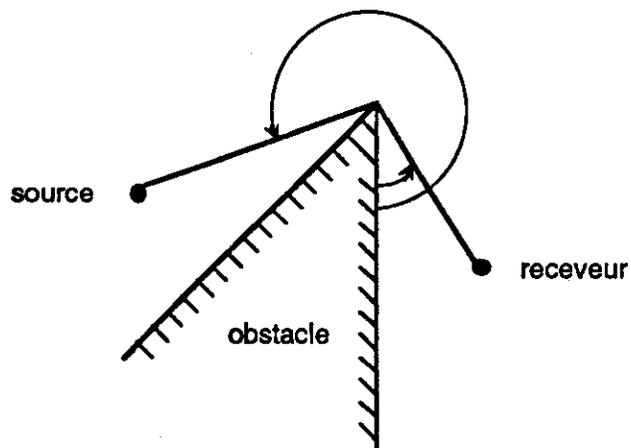


Figure 4 Définition des angles de diffraction.

Le coefficient de diffraction est défini par [L'Espérance et al., 1989] :

$$\phi_{\text{dif}} = -(\pi)^{-1} A(\xi) F_v(A, \alpha, \epsilon)$$

$$A(\xi) = \frac{1}{4}(-\xi - 3\pi) + \pi\delta(\pi - \xi),$$

$$\xi_1 = |\theta_r - \theta_0|$$

$$\delta(x) = 1 \text{ for } x \geq 0 \text{ or } \delta(x) = 0 \text{ for } x < 0,$$

$$F_v(A, \alpha, \epsilon) = \sum_0^{\infty} e^{-y} q(y, A, \alpha) \left(1 + \frac{j}{kL + jy}\right) \times (kL / kL + jy) dy,$$

$$q = (1/A) \tan^{-1}(\tan A \tanh X/2),$$

$$X = \sinh^{-1} \left(\frac{y}{\alpha} \frac{j}{2} - \frac{y}{4 kL} \right)^{1/2},$$

$$\epsilon = r_{RB} r_{SB} / L^2,$$

$$\alpha = k r_{RB} r_{SB} / L,$$

$$L = r_{SB} + r_{RB},$$

6.6 Validation du modèle de propagation sonore

La validation expérimentale du modèle de propagation a été menée en confrontant les prédictions du modèle aux mesures terrain. Des ajustements ont été apportés au modèle afin de rendre compte le plus fidèlement possible des conditions réelles d'utilisation des alarmes de recul.

7. RÉSULTATS

7.1 Mesures en laboratoire

L'Annexe II présente deux tableaux synthèses des mesures faites en laboratoire. Le premier tableau (II.1) présente les niveaux de pression acoustique enregistrés aux 10 points de mesure (selon ISO

3744), le niveau moyen ainsi que la puissance acoustique de chaque alarme. Le tableau II.2 présente de nouveau la puissance acoustique, la répétition de certaines mesures au point 10 ainsi que le contenu spectral de chacune des alarmes.

Sur la base de ces deux tableaux, 5 alarmes ont été retenues pour l'étude terrain. Il s'agit de la DAP 112, de la NORDIK 80, de la MicroAlarm, de la Warrick #8 et #12. Ces alarmes présentent différentes caractéristiques spectrales, temporelles (pulsé vs modulé) et varient en puissance acoustique, la Warrick #8 étant la moins puissante (91,5 dBA) et la DAP 112 (116 dBA) étant la plus puissante. Le type pulsé réfère à l'utilisation d'un son pur (par exemple, 1400 Hz) qui retentit une fois par seconde ("bip-bip-bip...") alors que le type modulé réfère à deux sons purs voisins (ex. 1250 et 1350 Hz) dont la somme crée des fluctuations de niveaux sonores et une variation dans la perception du contenu fréquentiel. Les cinq alarmes sélectionnées étaient représentatives des alarmes rencontrées sur le marché. Nous sommes donc confiants que les résultats de cinq alarmes peuvent être extrapolés aux alarmes non testées.

La Warrick (#8 ou #12) n'est pas généralement utilisée comme alarme de recul mais le type de signal sonore émis par cet avertisseur sonore s'apparente à celui émis par les alarmes de recul modulées. Par ailleurs, ce choix permettait de vérifier le champ acoustique derrière les véhicules lorsque le contenu spectral de l'alarme se situe en hautes fréquences (environ 2800 Hz).

7.2 Mesures sur le terrain

Les cinq alarmes de recul retenues à la section 7.1 ont été analysées sur le terrain. Il s'agit de deux alarmes de type pulsé et de trois alarmes de type modulé. Ces alarmes sont typiques de ce que l'on retrouve sur le marché québécois actuellement.

Les mesures ont été menées sur chacun des véhicules lourds sélectionnés à savoir le camion à benne, la niveleuse, la chargeuse et la bétonnière. Les résultats sont présentés sous forme de tableaux récapitulatifs pour chacun des véhicules (Annexe III). Quelques figures sont présentées dans les paragraphes qui suivent afin d'illustrer les résultats sous forme graphique. Les courbes tracées manuellement sur les figures réfèrent aux prédictions du modèle de propagation sonore ALARME. Ces résultats seront discutés à la section 7.3.

La figure 5 illustre un exemple des résultats obtenus à 1 m de la chargeuse sur laquelle était installée la Micro Alarm en position 1 et 2, en se déplaçant de l'axe 1 à 9. Le niveau de pression acoustique de l'alarme est présenté sur l'axe des y et la position relative à l'arrière de la chargeuse apparaît sur l'axe des x. Pour interpréter la courbe, il faut s'intéresser à l'enveloppe supérieure reliant les traits hachurés. Ces traits hachurés s'expliquent par la pulsation (on-off) de l'alarme. Les alarmes de type modulé ne présente pas ces larges traits. Cette figure met clairement en évidence des **variations importantes (de l'ordre de 10 à 15 dB)** de la pression sonore en fonction de la position derrière la chargeuse. Par ailleurs, les résultats obtenus sur l'axe 5 (fig. 6) montrent aussi un phénomène d'interférences important, surtout en position 2. Dans ce cas, les variations atteignent 22 dB dans certaines zones.

Sur la base des tableaux de l'Annexe III et les figures 5 et 6, on note que la différence entre les niveaux maxima et minima, lorsque le balayage est fait à 1 mètre entre les axes 3 et 7, varie entre **5 et 23 dB sur des distances de quelques dizaines de centimètres**. Cette différence est supérieure à 15 dB dans la majorité des cas.

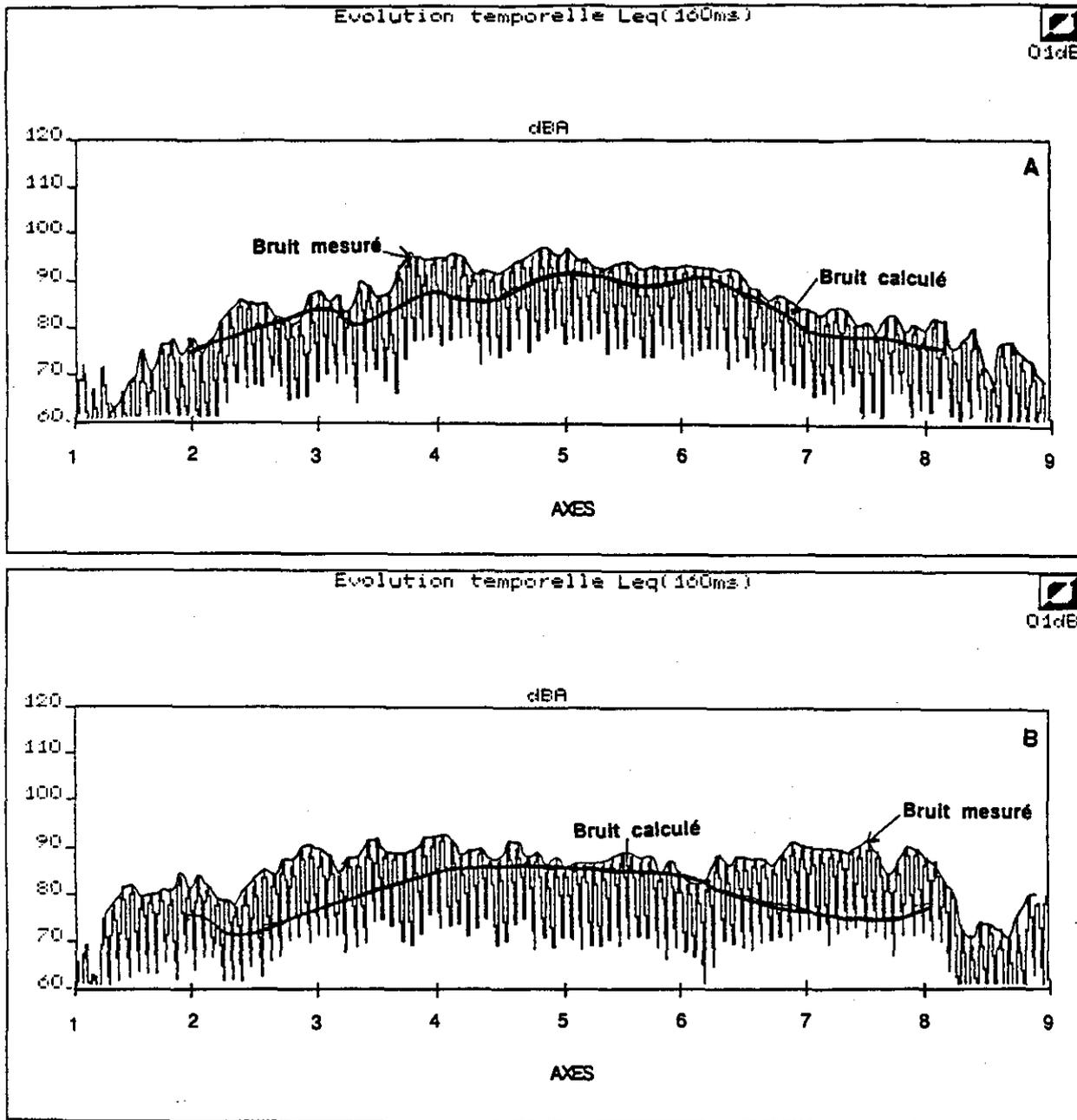


Figure 5. Niveaux de pression acoustique de l'alarme de recul Micro-Alarm à un mètre à l'arrière de la chargeuse, en se déplaçant de l'axe 1 à 9. A) en position 1 et B) en position 2.

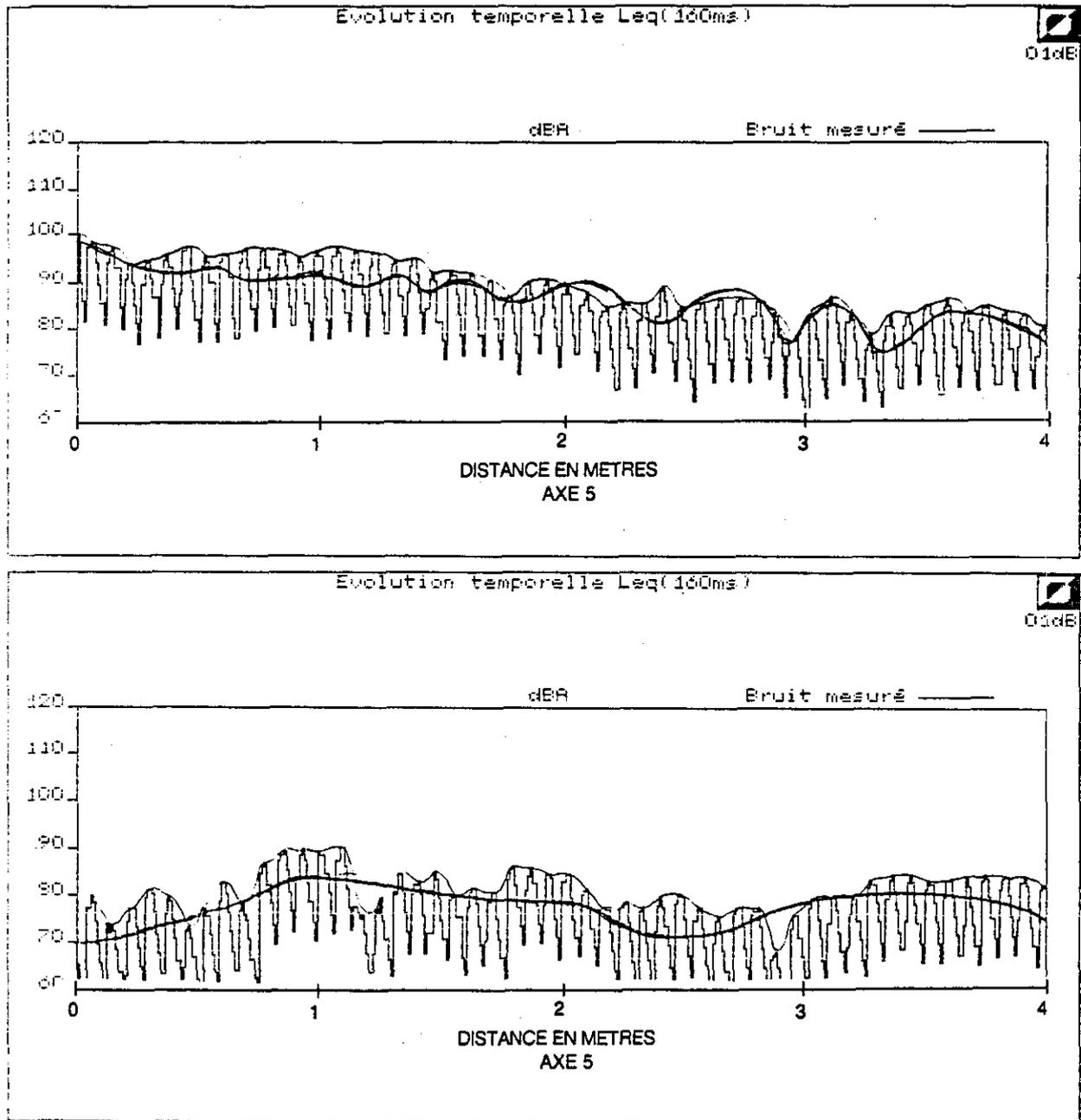


Figure 6. Niveaux de pression acoustique de l'alarme de recul Micro-Alarm le long de l'axe 5, de 0 à 4 mètres à l'arrière de la chargeuse. A) en position 1 et B) en position 2.

Par ailleurs, le nombre d'interférences est souvent plus marqué lorsque l'alarme est en position 2 mais la différence entre le L_{min} et le L_{max} n'est pas nécessairement plus importante à cette position. Le niveau de pression acoustique maximal atteint en position 2 (sous les véhicules) est dans tous les cas égal ou plus souvent inférieur au niveau en position 1. Cette différence atteint même 11-13 dB dans certains cas.

Quelques mesures ont été faites en combinant deux alarmes (une pulsée et une modulée) sur la niveleuse en position 1. Les figures 7 et 8 présentent les résultats pour les combinaisons Warrick #12 + Micro Alarm ainsi que pour DAP 112 + NORDIK 80. Dans les deux conditions, il y a présence d'interférences comparables à celles mises en évidence lorsqu'une seule alarme est en fonction, que ce soit pour le balayage à 1 mètre ou de 0 à 4 mètres sur l'axe 5.

Enfin, des essais ont été menés à proximité d'un mur d'acier afin d'évaluer l'effet d'un tel obstacle sur le champ sonore. Le mur était situé à 4 mètres à l'arrière du véhicule. La Micro Alarm et la DAP 112 ont été montées l'une après l'autre sur la chargeuse, en position 1. Des relevés ont été faits à 1 mètre du véhicule entre les axes 4 et 6 ainsi que sur l'axe 5, de 0 à 4 mètres. Dans les deux cas, des interférences de l'ordre de 10 à 20 dB sont mises en évidence. Ainsi la présence d'un obstacle ne semble pas éliminer ou atténuer les interférences acoustiques.

7.3 Modèle de propagation sonore

7.3.1 Présentation du logiciel ALARME

Le logiciel ALARME calcule le champ de pression acoustique à l'arrière des véhicules. Les résultats sont présentés sous forme de courbes d'iso-pression. La figure 9 montre un exemple typique de résultats obtenus avec le logiciel ALARME. L'espacement central correspond à la largeur du véhicule. De cette façon, il est plus facile de visualiser l'emplacement et l'ampleur des interférences acoustiques. L'algorithme du logiciel est présenté à la figure 10.

7.3.2 Comparaison des prédictions du logiciel ALARME avec les résultats acquis sur le terrain

Cette section a pour but de comparer les résultats expérimentaux aux résultats théoriques. Les courbes de pression obtenues lors des simulations avec le logiciel ont été retracées sur les courbes obtenues lors des mesures. Le trait plein et noir apparaissant sur les figures 5 à 8 correspond aux résultats obtenus lors des simulations.

En général, les résultats mesurés et calculés sont comparables. Les interférences acoustiques ont sensiblement la même position et sont d'amplitude comparable. Certaines courbes semblent être décalées par rapport aux mesures. Cela peut s'expliquer par une "erreur" introduite lors du dépouillement des résultats sur les bandes audionumériques. En effet, il faut démarrer le processus de dépouillement de façon manuelle et cela peut introduire un décalage de quelques secondes sur le graphique. Avec un tel décalage, l'axe 5, par exemple, ne serait pas tout à fait au centre mais un peu plus à droite ou à gauche.

Un autre phénomène se produit avec l'avertisseur sonore Warrick (#8 et #12): il y a une sous-estimation d'environ 10 dBA, sur tout le graphique, entre les mesures et les prédictions du modèle. Cet avertisseur émet un signal dans une bande fréquentielle élevée et est par conséquent très directif (la directivité augmente en fonction de la fréquence). Pour remédier à ce problème, il faudrait tenir compte de ce facteur lors des mesures et des calculs pour obtenir la puissance acoustique. En effet, les calculs de la puissance acoustique ont été faits à partir d'un L_{eq} moyen obtenu à partir de 10 points de mesures répartis sur une demie sphère située à 1 mètre de l'alarme. Le logiciel ALARME tient compte de la directivité des alarmes mais il utilise une directivité moyenne, peu importe la fréquence générée par l'alarme. En utilisant une directivité propre à la fréquence de l'alarme, les résultats seraient plus précis.

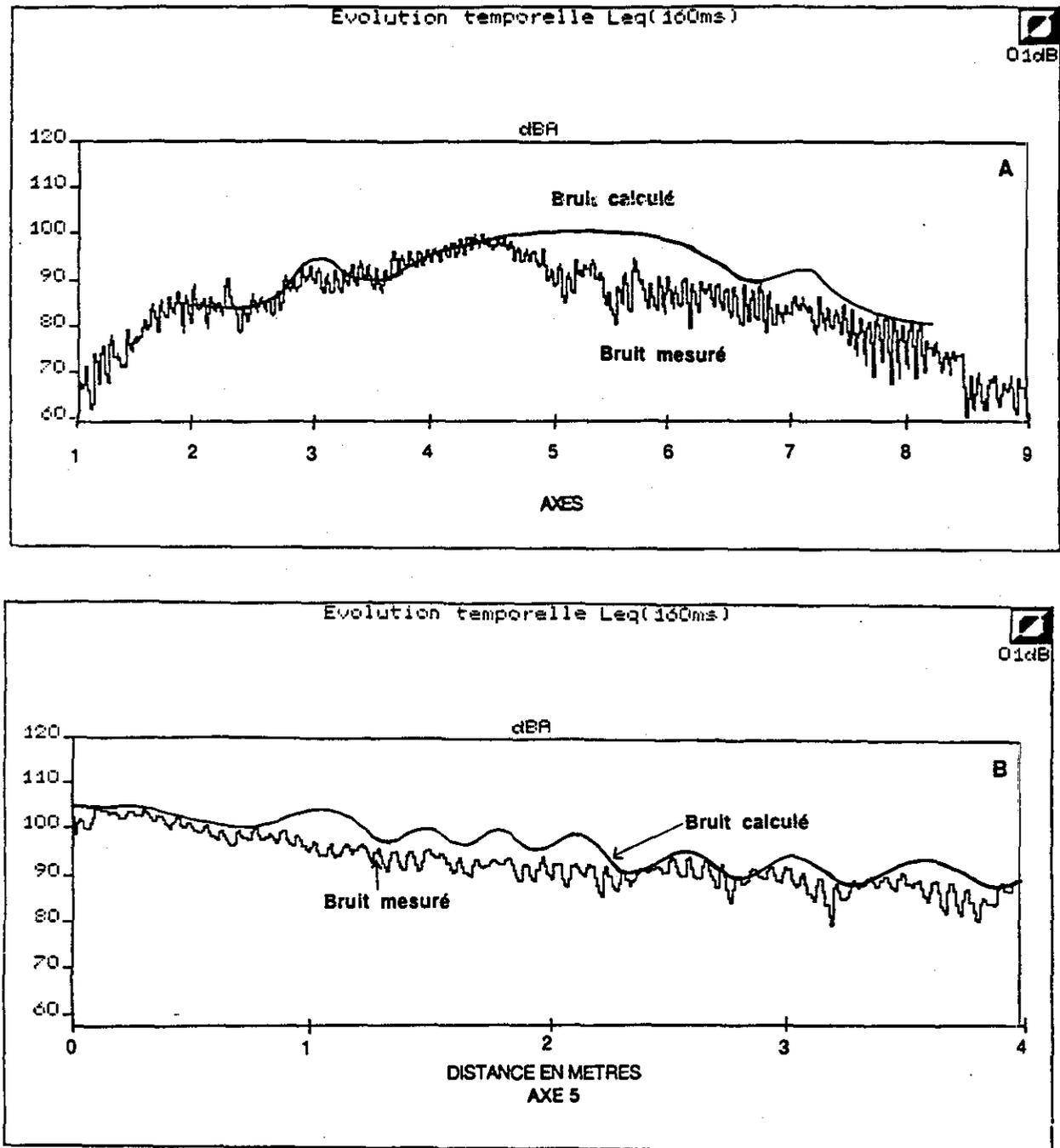


Figure 7. Niveaux de pression acoustique des alarmes de recul Warrick #12 et Micro Alarm mises en fonction simultanément, en position 1. A) axes 1 à 9 et B) axe 5, 0-4 mètres.

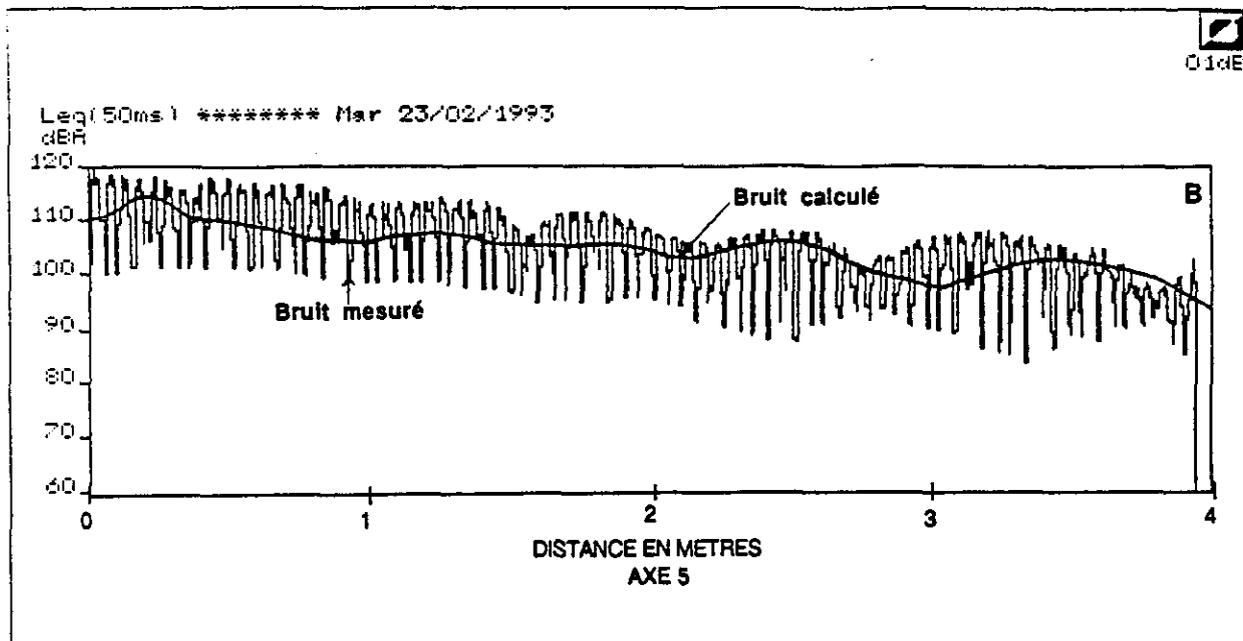
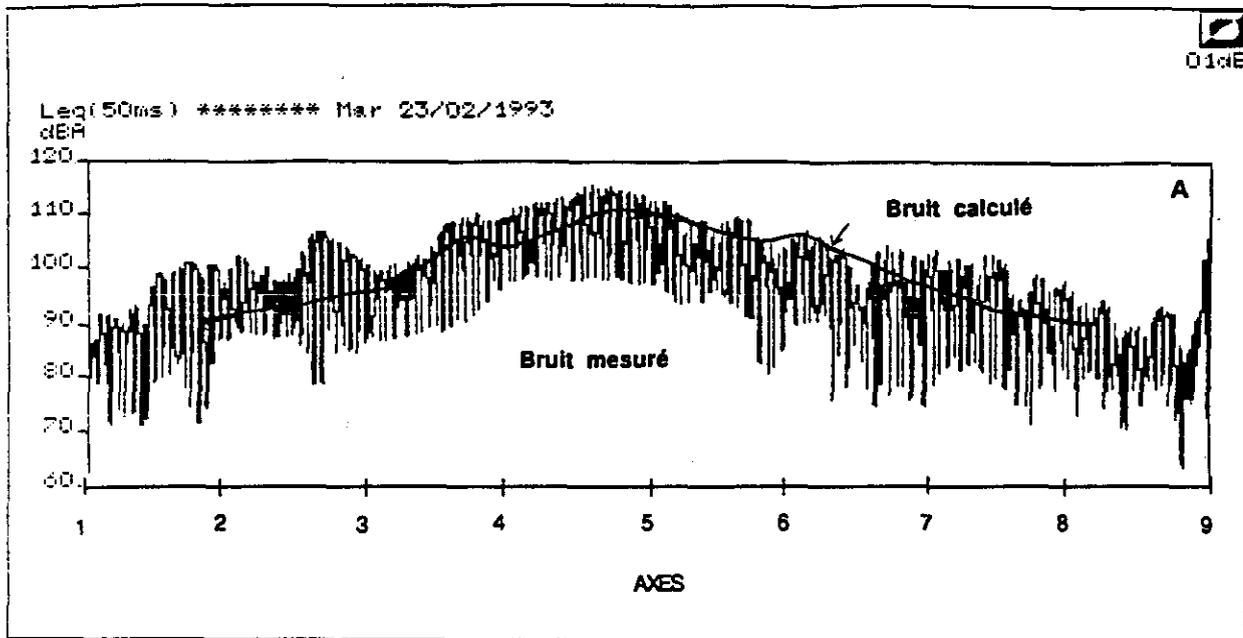


Figure 8. Niveaux de pression acoustique des alarmes de recul DAP 112 et NORDIK 80 mises en fonction simultanément, en position 1. A) axes 1 à 9 et B) axe 5, 0-4 mètres.

Les caractéristiques de la directivité ne sont pas fournies par le fabricant. Il devient donc difficile pour un utilisateur moyen d'avoir accès à cette information. Cette sous-estimation d'environ 10 dBA ne concerne que les niveaux de pression acoustique enregistrés en tout point derrière les véhicules. Elle n'affecte pas l'allure des interférences.

La position 2 sur les véhicules n'a pas été simulée par le logiciel ALARME, sauf dans le cas de la chargeuse. La complexité des rayons réfléchis et diffractés explique ce fait. Le temps nécessaire au développement d'un algorithme plus complexe a été jugé trop important compte tenu des résultats terrain. En effet, les mesures terrain ont démontré que cette position n'est pas à privilégier: le niveau de pression acoustique est souvent plus faible et le nombre d'interférences acoustiques plus important qu'en position 1.

La bétonnière représente un cas différent des autres. Ce véhicule était muni d'une boîte de bois à l'arrière. Cette boîte entraîne des complications pour la modélisation. En effet, en observant une courbe d'iso-pression de la bétonnière comme celle illustrée à la figure 11 (la boîte étant représentée en blanc), on note une démarcation dans la courbe d'iso-pression à partir du coin gauche de la boîte. Cette démarcation se poursuit en montant vers la droite. Elle est due au fait que le logiciel n'utilise que deux rayons (un incident et un réfléchi). Dans ce cas particulier, il faudrait avoir recours à deux rayons réfléchis; un qui passe au-dessus de la boîte et un qui passe à gauche. Le modèle ne présente cette lacune que dans la région immédiate de la démarcation (environ 50 centimètres de chaque côté). Dans les autres zones, deux rayons sont suffisants pour représenter le champ de pression acoustique.

Véhicule étudié : chargeuse

Alarme utilisée : pulsée

F1 = 1250 Hz P1 = 110 dB

Position : 2, sous la chargeuse, près du différentiel

Coordonnées : x=0.25m y=0.05m

Hauteur du receveur : 1.50m

Dimension de côté : 4.0m

Dimension du maillage : 0.10m

Sol étudié : graviers

60 dBA

65 dBA

70 dBA

75 dBA

80 dBA

85 dBA

90 dBA

95 dBA

100 dBA

105 dBA

110 dBA

115 dBA

125 dBA

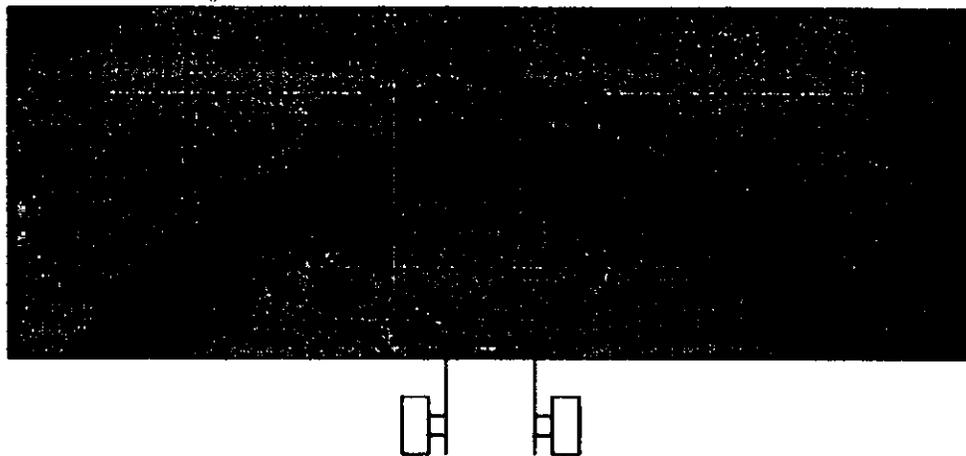


Figure 9 Exemple de résultats du logiciel ALARME.

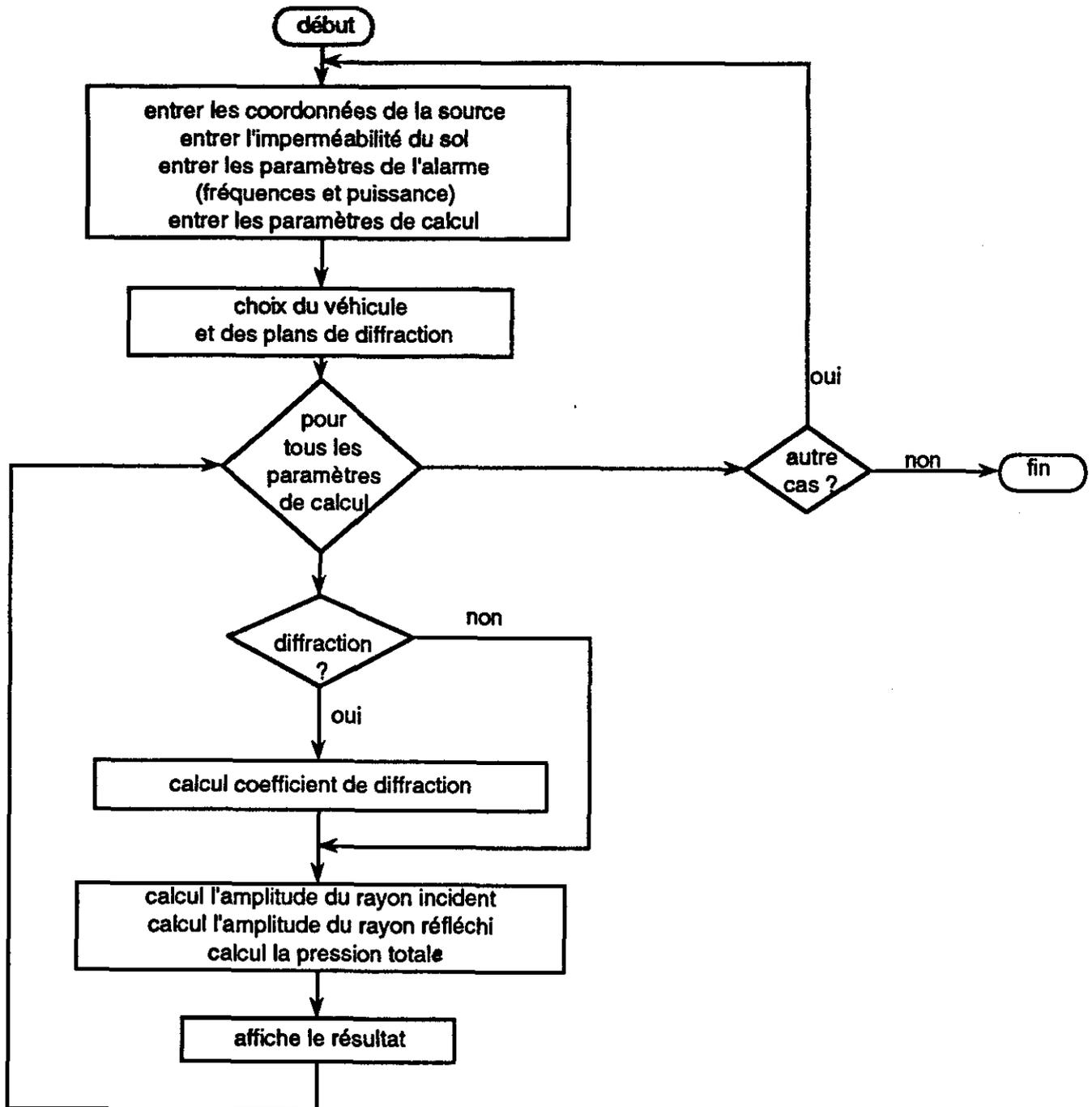


Figure 10 Algorithme du logiciel ALARME.

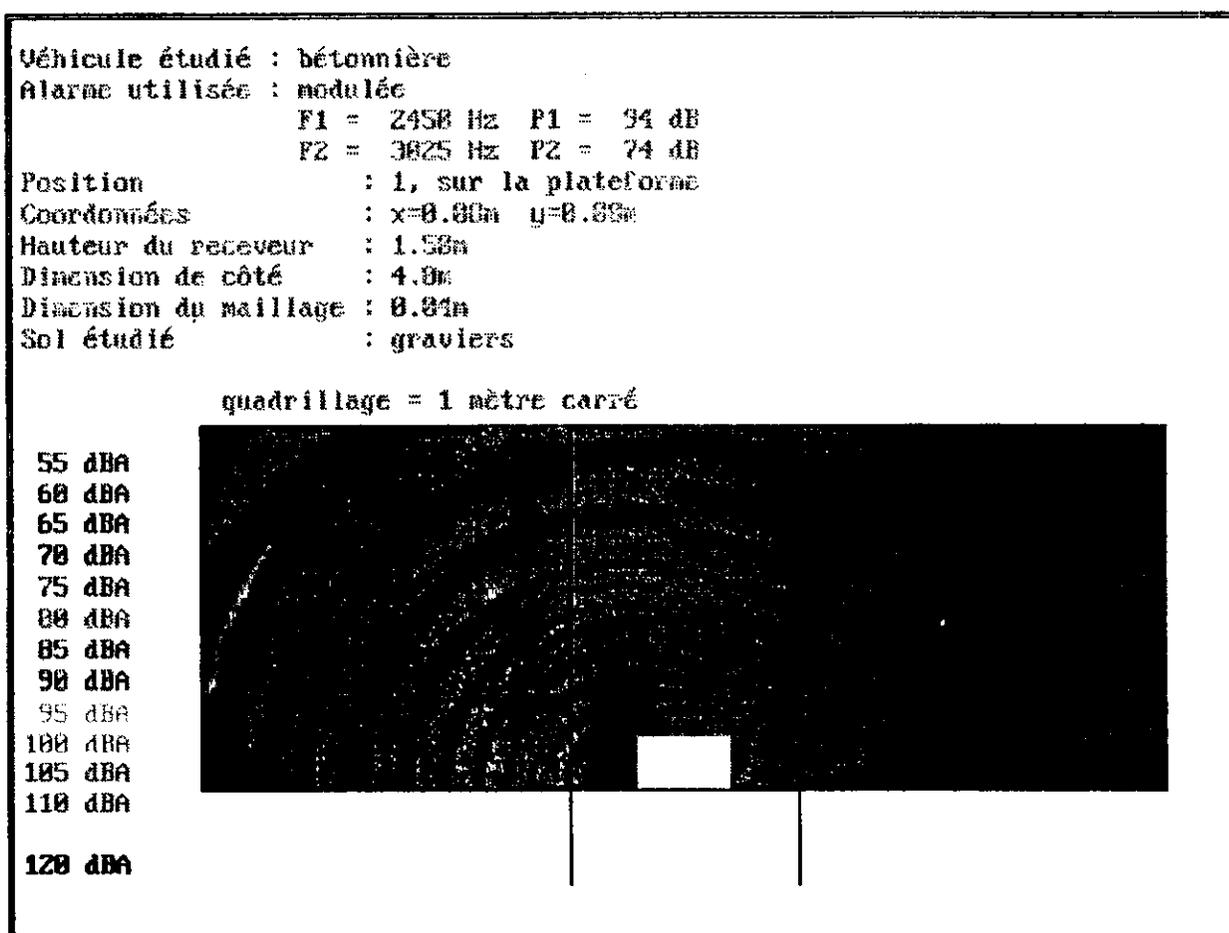


Figure 11

Courbes d'iso-pression pour l'alarme de recul Warrick #12 installée en position 1 (re: mesures terrain) sur la bétonnière.

8.0 DISCUSSION

Les alarmes de recul installées sur les véhicules lourds circulant sur les chantiers de construction québécois doivent être conformes à la norme SAE J994 citée à l'article 3.10.12 du Code de sécurité pour les travaux de construction. La norme SAE J994b-1974 (mise à jour en 1985) (SAE, 1985) définit un code d'essai pour la mesure des caractéristiques acoustiques des alarmes de recul. L'alarme de recul doit être testée en champ libre à 4 pieds au-dessus d'un plan horizontal réfléchissant ou un équivalent de laboratoire, le microphone étant positionné à 4 pieds de l'alarme le long de l'axe de 0 degré. Sur la base de ces mesures, l'alarme est classifiée en fonction de son niveau sonore: Type A: 112 dBA, Type B: 107 dBA, Type C: 97 dBA, Type D: 87 dBA et Type E: 77 dBA. La fréquence prédominante de l'alarme doit se situer dans la gamme de 700 à 2800 Hz. Le cycle de pulsations doit être de 1 à 2 par seconde. La durée des intervalles "on" et "off" doit être approximativement d'égale longueur. Malgré ces caractéristiques acoustiques précises, on est en droit de se demander si celles-ci assurent véritablement la sécurité des travailleurs qui doivent percevoir ces alarmes sur les chantiers. Pour répondre à cette interrogation, des mesures acoustiques ont été menées dans des situations réalistes d'utilisation des alarmes de recul sur un camion à benne, une niveleuse, une chargeuse et une bétonnière.

Les résultats démontrent une lacune importante de la norme SAE J994b. Même si l'alarme de recul atteint un certain niveau de pression sonore à 4 pieds sur l'axe de 0 degré, ce niveau ne sera pas maintenu sur des axes s'éloignant de l'axe de 0 degré. Il existe des zones d'interférences des ondes sonores en certains points derrière les véhicules lourds testés. Ces interférences atteignent plus de 20 dB dans certains cas. Dans un environnement sonore bruyant tel que l'on retrouve sur un chantier de construction, ces interférences revêtent une très grande importance. L'alarme de recul peut être rendue complètement inaudible par la présence du bruit de fond dans certaines zones derrière les véhicules. Il n'est pas acceptable d'avoir à faire face à des changements de 10-15 dBA, parfois 20 dBA, entre deux points espacés de quelques dizaines de centimètres. Ainsi, même si les niveaux de pression acoustique de l'alarme peuvent atteindre 90 et même 110 dBA en certains points, ceci n'est pas gage de sécurité. En effet, si à un moment le niveau est de 110 dBA et quelques centimètres plus loin, celui-ci chute à 90 dBA, le travailleur pourrait avoir l'impression que le véhicule s'éloigne de lui alors qu'il peut s'agir de l'inverse. Par ailleurs, les capacités auditives d'une forte proportion de travailleurs peuvent être altérées à cause d'une exposition de plusieurs années aux bruits de chantier (Simpson, 1989). Dans ces conditions, il est reconnu que le bruit ambiant peut provoquer un masquage plus marqué de l'alarme que chez des auditeurs normaux (Laroche et al., 1990).

Il est important de noter que la norme SAE J994 est présentement en révision afin de combler les lacunes reliées à la seule mesure à 0 degré. La nouvelle version intègre des mesures à plusieurs angles. Les auteurs de la présente étude s'interrogent toutefois sur l'impact de ce changement. En fait, cette norme ne préconise qu'une méthode de mesure pour vérifier certaines caractéristiques des alarmes de recul. Elle ne statue aucunement sur l'aspect sécuritaire d'une alarme de recul en particulier. Il est en effet spécifié à l'article 6.5.2 du texte en révision:

"This document does not specify any limitations on sound variation as a function of direction from the alarm but does require that the sound variation profiles be made available upon request".

La norme SAE J1446 (1983) poursuit davantage l'objectif d'assurer l'audibilité de l'alarme de recul. Les critères proposés dans cette norme sont discutables et mériteraient d'être analysés plus en profondeur avant d'être cités intégralement dans le Code de sécurité pour les travaux de construction.

Causes des interférences acoustiques

La plupart des alarmes de recul sont composées de sons purs (autour de 1400 Hz) ou de modulations entre deux sons purs de fréquences voisines (1250 et 1350 Hz). La figure 12 illustre deux phénomènes physiques responsables de l'annulation des ondes. Les ondes sonores émises par

l'alarme sont réfléchies sur le sol (R2) ou diffractées (R1) par les parois des véhicules avant d'atteindre le receveur (P1 ou P2). Lorsque, en un point donné, les ondes sonores réfléchies ou diffractées sont déphasées de 180° par rapport aux ondes directes, il y a annulation des ondes sonores et variation importante du niveau de pression sonore. Le modèle informatisé de propagation sonore ALARME a permis de confirmer les résultats obtenus sur le terrain, pour l'ensemble des véhicules.

Il est important de souligner que la directivité des alarmes de recul peut être responsable, dans une certaine mesure, de la variation du niveau de pression acoustique. Nous sommes en fait en présence de deux phénomènes qui interagissent entre eux. Si la directivité avait prédominé dans l'ensemble des cas, nous aurions enregistré des chutes graduelles du niveau de pression acoustique en s'éloignant de chaque côté du véhicule. Dans la majorité des cas, il s'agit de variations multiples (creux et crêtes) sur une distance de quelques mètres qui ne s'apparentent pas exclusivement à la chute graduelle due à la directivité. Le phénomène d'interférence n'est donc pas négligeable dans bien des cas.

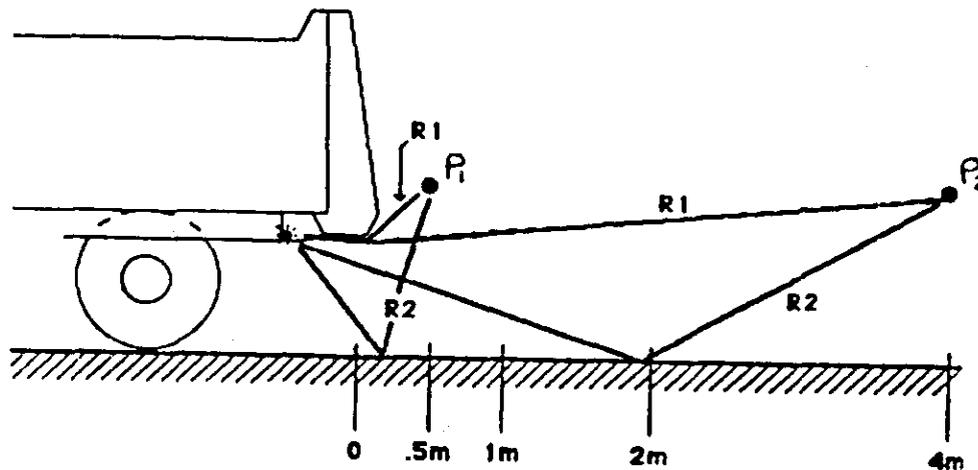


Figure 12. Schéma des rayons sonores existant entre l'alarme et le récepteur.

9.0 CONCLUSION DE LA DEUXIÈME PARTIE

Les résultats acquis sur les quatre véhicules sélectionnés dans cette étude ont permis de confirmer les conclusions émises suite à l'étude exploratoire de Laroche et al. (1990) menée sur un camion à benne.

Premièrement, les alarmes de recul ne devraient pas comporter un seul son pur. Les risques d'annulations d'ondes sonores sont trop importants. Dans cette étude, des variations de niveau de pression acoustique de plus de 15 dB ont été notées derrière la plupart des véhicules munis des différentes alarmes sur des distances de quelques dizaines de centimètres. Pour contrer ce phénomène et uniformiser le champ sonore, les alarmes devraient comporter plusieurs composantes fréquentielles dans la gamme de 500 à 2000 Hz, sans toutefois être des harmoniques. Il est ainsi peu probable que toutes les ondes sonores subissent une annulation simultanément. Au-delà de 2000 Hz, l'ajout de composantes fréquentielles risque d'être inutile puisque la surdité professionnelle atteint éventuellement cette zone.

Deuxièmement, l'emplacement de l'alarme sur un véhicule lourd est critique. Plusieurs propriétaires de flottes de véhicules installent les alarmes sous ces véhicules pour les protéger des chocs et des intempéries. Les résultats présentés à la section 7 démontrent l'effet néfaste de cet emplacement (position 2 lors des mesures). Le niveau de pression acoustique est très souvent atténué et le nombre d'interférences est souvent plus important si on les compare à la position 1. Le choix de l'emplacement présente toutefois certains problèmes. Par exemple, sur les camions à benne, il est difficile d'envisager d'installer l'alarme directement sur la porte basculante de la benne car elle risquerait d'être endommagée. Par ailleurs, il arrive que la porte soit enlevée pour le transport de marchandises. Dans ce cas, l'alarme de recul serait du même coup éliminée.

Troisièmement, il ne faudrait pas oublier de souligner l'importance de réduire le bruit qui règne actuellement sur les chantiers de construction. Ceci éviterait que ce bruit ambiant masque les alarmes de recul, nuise à la localisation et diminue les capacités auditives des travailleurs à long terme.

Enfin, sur la base des résultats de cette étude, aucune alarme de recul ne s'avère sécuritaire en tout point derrière les véhicules lourds. Il est donc nécessaire de poursuivre les travaux afin de déterminer les caractéristiques acoustiques et d'emplacements optimaux sur les véhicules lourds circulant sur les chantiers de construction. Le logiciel de propagation sonore ALARME devrait permettre de rencontrer cet objectif ultime, i.e. uniformiser le champ sonore derrière les véhicules lourds. Parallèlement à cette étude, des travaux devraient être menés sur les détecteurs d'obstacles et les appareils qui sollicitent la modalité visuelle des chauffeurs afin, d'une part, de diminuer le phénomène d'habituation auditive et d'autre part, d'améliorer la visibilité dans les angles morts.

10.0 TROISIÈME PARTIE: MISE AU POINT D'UN SIMULATEUR D'ALARME DE REcul ET IDENTIFICATION DES CARACTÉRISTIQUES ACOUSTIQUES ET D'EMPLACEMENTS OPTIMAUX

Les sections qui suivent portent sur la troisième phase du projet. Les deux premières phases ont démontré qu'il existe des interférences acoustiques importantes qui peuvent compromettre la sécurité des travailleurs. La présente phase vise à identifier les caractéristiques acoustiques qui permettraient la conception d'une alarme de recul plus sécuritaire.

La recherche des caractéristiques acoustiques se divise en sept étapes:

- Recherche des paramètres acoustiques des alarmes de recul et simulation du patron de propagation acoustique derrière les véhicules lourds à l'aide du logiciel ALARME.
- Conception d'un simulateur d'alarme de recul intégrant les paramètres acoustiques déterminés précédemment.
- Mesures sur le terrain à l'aide du simulateur d'alarme de recul afin de valider le choix des paramètres acoustiques.
- Analyse des données recueillies.
- Validation du modèle de propagation.
- Évaluation et appréciation de 5 alarmes par des intervenants du milieu de la construction.
- Évaluation de l'efficacité de l'alarme retenue par les intervenants, à l'aide du logiciel Détection^{MD}.

Les paragraphes qui suivent présentent les méthodes employées et les résultats obtenus pour chacune des étapes mentionnées ci-haut. Les résultats sont par la suite discutés et des recommandations sont formulées.

11.0 MÉTHODE

11.1 Recherche de paramètres acoustiques et d'emplacements optimaux

Le principal critère utilisé pour évaluer le niveau d'efficacité de l'alarme est sa capacité à générer un champ de pression sonore uniformément décroissant à l'arrière du véhicule. L'expression "uniformément décroissant" signifie que le niveau sonore décroît en s'éloignant de la source et qu'il n'y a pas d'interférence acoustique engendrant une diminution du niveau sonore de plus de quelques décibels (dB) sur une courte distance, soit environ 1 mètre (Laroche et al., 1993). En plus de répondre au critère précédent, les alarmes devront posséder des caractéristiques acoustiques qui permettent leur détection, leur reconnaissance et leur localisation auditive par des auditeurs ayant une audition normale et par ceux atteints de surdité. L'alarme doit également véhiculer une information qui revêt un caractère d'urgence.

La détection est définie comme le seuil d'audibilité d'un signal sonore (Wilkins et Martin, 1987). Pour permettre la détection, il faut que le contenu fréquentiel soit distinct du bruit ambiant, compris entre 300 et 3000 Hz et avoir au moins 2 composantes audibles qui sont des harmoniques de fréquences fondamentales comprises entre 150 et 1000 Hz (ISO 7731, 1986; Laroche et al., 1991; SAE J994, 1985).

La reconnaissance réfère à la capacité du système auditif à reconnaître un signal sonore parmi d'autres signaux sonores (Wilkins et Martin, 1987). Pour assurer la reconnaissance, le niveau de pression sonore doit se situer entre 10 et 25 dBA au-dessus du seuil masqué (Laroche et al., 1991), en respectant une limite supérieure de 105 dBA et une limite inférieure de 65 dBA (ISO 7731, 1986). De plus, l'alarme ne doit pas générer plus de 6 signaux sonores différents (ISO 7731, 1986; Patterson, 1982).

La localisation auditive réfère à la capacité du système auditif à localiser une source sonore dans l'espace (Laroche, 1994). Dans le plan horizontal, les erreurs les plus fréquentes sont commises avec les tons purs situés entre 1500 et 3000 Hz. Les bruits continus de large spectre sont plus faciles à localiser et les bruits brefs doivent être assez longs, soit de 1 à 2 secondes, pour permettre un mouvement de la tête. Dans le plan vertical, un bruit à spectre large est recommandé. En effet, dans ce cas-ci, l'oreille détermine l'emplacement de la source sur la base du spectre. Par exemple un son dont le spectre est limité à 8 kHz est toujours localisé au-dessus de la tête alors qu'un son de 1 kHz est plutôt localisé vers l'arrière. Quelle que soit son origine, un bruit de basses fréquences semble provenir de l'arrière et il semble plus éloigné qu'un bruit de hautes fréquences. Pour assurer la localisation lorsque le niveau sonore ambiant est élevé, il faut que le niveau sonore de l'alarme soit de 10 à 15 dBA au-dessus du seuil masqué. Par ailleurs, le seuil de *localisation* des signaux de hautes fréquences est plus élevé que le seuil de *détection* alors que ces deux seuils sont similaires en basses fréquences.

Afin de véhiculer un caractère d'urgence, l'alarme doit posséder certaines caractéristiques. Pour les alarmes de type pulsé, il faut que le délai entre les pulses soit inférieur à 200 msec pour une situation d'urgence et supérieur à 300 msec pour une situation non urgente (Patterson, 1982). La norme SAE J994, quant à elle, recommande 1 à 2 pulses par seconde. Pour les alarmes de type modulé ou variant en hauteur (5 pulses ou plus par seconde), il faut que la durée de montée et de décroissance soit comprise entre 20 et 30 msec et que la durée d'un pulse se situe entre 100 et 150 msec.

Lors du développement du simulateur d'alarme de recul, on doit prendre en considération que les travailleurs qui auront à percevoir cette alarme peuvent être atteints de surdité professionnelle ou de surdité d'autres origines. Le spectre de l'alarme et son niveau doivent donc être ajustés afin de permettre la détection, la reconnaissance et la localisation de la source sonore. Pour ce faire, le spectre ne doit pas dépasser 3000 Hz, zone fréquentielle où la surdité professionnelle ou les autres types de surdités neuro-sensorielles se manifestent généralement de façon plus marquée. Le niveau de pression sonore de l'alarme sera fonction des seuils masqués des sujets atteints de surdité. Pour connaître ces seuils masqués, le logiciel Détectson^{MD} sera utilisé en complément au logiciel ALARME.

Le port de protecteurs auditifs sera aussi considéré lors de l'analyse avec le logiciel Détectson^{MD} puisque ces derniers peuvent perturber la perception et la localisation des sources sonores (Laroche, 1994).

En tenant compte des paramètres acoustiques présentés ci-haut, le logiciel ALARME, développé lors de la phase II et modifié afin de pouvoir simuler une alarme ayant jusqu'à 5 fréquences différentes, a été utilisé pour les calculs du champ sonore à l'arrière des véhicules. Les simulations se sont limitées à deux positions par véhicule, soit une position avec l'alarme directement à l'arrière du véhicule, sans aucune diffraction ni obstacle entre l'alarme et le receveur, soit une position avec l'alarme camouflée en partie par un obstacle, créant ainsi une certaine quantité de diffraction. Pour chaque position d'alarme, il y a eu une simulation avec 3 fréquences et une autre avec 4 fréquences. Après quelques essais avec le simulateur d'alarme décrit à la section 11.2, les auteurs ont convenu qu'une alarme ayant plus de 4 fréquences ne correspond pas à une solution réaliste: le signal est trop différent de ceux auxquels les travailleurs sont habitués.

11.2 Conception d'un simulateur d'alarme de recul respectant les caractéristiques acoustiques optimales

Cette étape du projet a été menée conjointement avec la firme québécoise DAP Électronique Canada Ltée, spécialisée dans la conception d'alarmes de recul. La firme DAP a fait appel à la compagnie CPU Design Inc. à titre de sous-contractant. Un simulateur d'alarme répondant aux caractéristiques acoustiques identifiées lors des simulations a été fabriqué. Ce simulateur a servi lors des mesures in-situ.

Deux contraintes ont dû être prises en compte lors du développement du simulateur. La directivité prononcée du haut-parleur a influencé le choix de certains paramètres acoustiques. Lorsqu'un haut-parleur est directif, cela signifie que le champ de pression sonore généré n'est pas constant autour du haut-parleur. Ce problème avait été soulevé lors de la phase II du projet (Laroche et al., 1993). La position de l'alarme et le choix du contenu fréquentiel devaient être choisis en tenant compte de la directivité. En effet, la directivité varie en fonction de la fréquence: les hautes fréquences sont beaucoup plus directives que les basses fréquences. La deuxième contrainte concerne le choix du contenu fréquentiel qui devait aussi tenir compte de la réponse en fréquence du haut-parleur. Ce dernier ne pouvait reproduire fidèlement les fréquences en-dessous de 1000 Hz, à cause de sa petite dimension.

11.3 Mesures in-situ

11.3.1 Véhicules utilisés

Le simulateur d'alarme a été monté sur 3 des 4 types de véhicules utilisés lors de la phase II du projet. Il s'agit du camion à benne, du chargeur et de la niveleuse. Ce sont les 3 types de véhicules lourds que l'on retrouve le plus souvent sur les chantiers de construction. Les mesures n'ont pas été effectuées sur la bétonnière, car cet engin n'était pas disponible durant la période de mesure (octobre 1994).

11.3.2 Instruments

Les mesures des niveaux de pression acoustique du simulateur ont été faites en différents points derrière les véhicules lourds à l'aide d'un enregistreur audionumérique (DAT, TEAC DAP-20) muni d'un contrôleur (Sonométric) et d'un microphone de type 1 (Cirrus, MK-224). Une voie servait à l'enregistrement du niveau sonore et l'autre servait à l'enregistrement des signaux de contrôle provenant du contrôleur. Ces derniers ont facilité le dépouillement des enregistrements audionumériques. Le

microphone était monté sur une perche afin de l'éloigner de la personne en charge des mesures, le but étant de minimiser les interférences acoustiques avec un obstacle.

11.3.3 Site de mesure

Les véhicules étaient positionnés tour à tour dans la cour arrière du garage municipal de la ville de Sherbrooke. Le site de mesure était comparable à un chantier de construction. Le sol était recouvert de gravier ou de terre légèrement compactée. Les véhicules, immobiles lors des mesures, étaient toujours situés de façon à éviter les réflexions d'ondes sonores sur les bâtiments ou sur d'autres véhicules.

11.3.4 Conditions climatiques

Les mesures ont été menées au mois d'octobre 1994 et les conditions climatiques répondaient aux normes usuelles. La température variait peu d'une journée à l'autre et se maintenait entre 6° C et 10° C. Notons ici que la température peut influencer les instruments de mesure, mais elle a un impact négligeable, comme l'humidité et le gradient de vent, sur la propagation sonore sur de courtes distances (Beranek, 1988).

11.3.5 Déroulement des mesures

Les mesures ont été menées sur des véhicules avec le simulateur générant, tour à tour, 3, 4 et 6 fréquences et un balayage en fréquences ("sweep"). Les deux premiers cas correspondaient aux fréquences et aux emplacements déterminés lors des simulations. Pour les autres cas, deux positions d'alarme ont aussi été étudiées. Les positions variaient d'un véhicule à l'autre. L'annexe 2 présente des croquis des différents emplacements. Ces emplacements ont été choisis pour être le plus représentatif de ce que l'on retrouve ou peut retrouver actuellement sur les véhicules lourds, tout en gardant comme objectif d'avoir un niveau de pression sonore uniformément décroissant.

Les mesures ont été faites selon plusieurs axes à l'arrière du véhicule, comme le démontre la figure 13. L'expérimentateur se déplaçait à vitesse constante le long des axes de mesure, soit en 10 ou 15 secondes, selon la longueur de l'axe. À noter le nombre élevé d'axes qui s'éloignent du véhicule. Ces axes représentent une manœuvre de recul d'un véhicule lourd. Aucune mesure n'a été effectuée sur les côtés du véhicule, ces zones étant considérées à moindre risque.

11.4 Analyse des données

Les données enregistrées sur rubans magnétiques à l'aide de l'enregistreur audionumérique et du contrôleur ont été dépouillées avec les logiciels dBFETE et dBSEUIL. Ce type de système d'acquisition est conforme à la classe 1 de la norme CEI 804 (1985). Les logiciels dBFETE et dBSEUIL permettent de visualiser le niveau de pression sonore en fonction de la distance parcourue derrière le véhicule étudié. La vitesse d'échantillonnage a été choisie de façon à obtenir une valeur de pression acoustique à chaque 0.02 m ou 0.03 m.

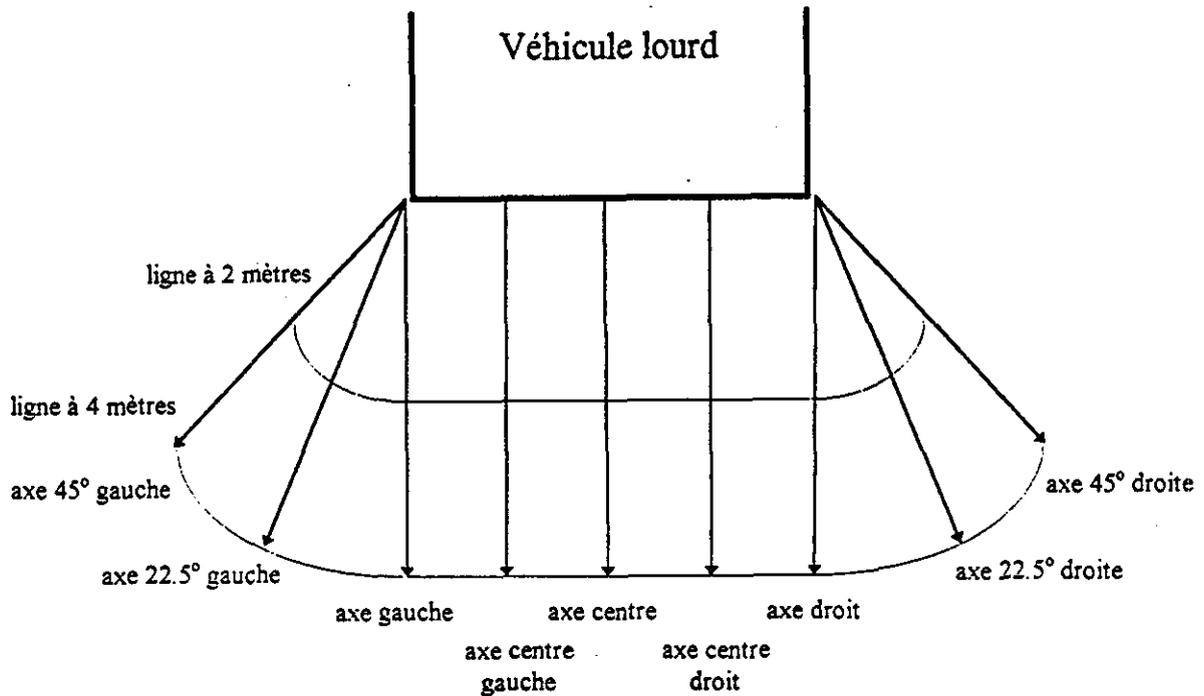


Figure 13 Axes de mesure à l'arrière des véhicules.

11.5 Validation du modèle de propagation

La validation expérimentale du modèle de propagation a été menée en confrontant les prédictions du modèle aux mesures in-situ. Des ajustements, surtout du côté de l'amplitude du signal, ont été apportés au modèle afin de rendre compte le plus fidèlement possible des conditions réelles d'utilisation des alarmes de recul.

11.6 Validation du simulateur d'alarme auprès d'utilisateurs

Le simulateur d'alarme mis au point à l'étape 11.2 a été présenté à plusieurs intervenants du secteur de la construction. Le but de cette présentation était d'identifier les préférences des utilisateurs. Cinq alarmes différentes, dont deux avaient donné de bons résultats lors des essais terrain et deux autres des résultats médiocres, leur ont été soumises. La cinquième alarme, celle déjà installée sur le véhicule, représentait le type d'alarme entendue fréquemment sur les chantiers. Les combinaisons étaient les suivantes:

Bons résultats: 1000, 1150 et 1300 Hz;
1300, 1450, 1650 et 1750 Hz.

Résultats médiocres: 1000, 1200 et 1300 Hz;
1000, 1400, 1500 et 1600 Hz.

Les meilleures combinaisons sont issues des données recueillies sur le chargeur et la niveleuse. Ces combinaisons ne représentaient pas autant d'intérêt sur le camion à benne à cause des emplacements de l'alarme choisis lors des essais terrain. Des simulations, avec les combinaisons donnant de bons

résultats, ont été refaites avec le logiciel ALARME en positionnant l'alarme près des phares arrières du camion, zone où la visibilité de l'alarme est bonne. Ces combinaisons ont donné de bons résultats.

Les participants provenaient de plusieurs milieux. Trois représentants syndicaux (Section locale 791, FTQ), un représentant de la CSST, un représentant de l'ACEQ, deux représentants patronaux (Désourdy) et un représentant de l'ASP construction ont participé à la validation. Ils avaient été invités à participer à cette étude lors d'une réunion du comité de réglementation sur les chantiers de construction. Les principaux milieux reliés au secteur de la construction étaient donc représentés.

Les participants à cette démonstration devaient indiquer laquelle des 5 alarmes ils préféraient. Ils devaient s'attarder principalement à la tonalité des alarmes. Un questionnaire leur était distribué afin de les guider dans leur évaluation. Lors de la démonstration, le 10 mars 1995, il y avait de la neige au sol, la température était de -10° C et le vent inférieur à 5 m/sec. Ces conditions climatiques n'étaient pas idéales. La démonstration a quand même eu lieu afin de respecter les échéanciers du projet et afin de profiter de la présence des intervenants. À notre avis, les résultats présentés à la section 12.3 sont tout de même pertinents pour orienter le développement de nouvelles alarmes de recul.

Lors de la validation, le simulateur a été installé sur un camion à benne de la compagnie Désourdy sur leur site de St-Hubert. L'emplacement de l'alarme a été choisi de façon à assurer sa visibilité à l'arrière du véhicule. L'emplacement choisi se situe juste à côté d'un des phares de recul. Le simulateur était contrôlé de l'intérieur d'une automobile positionnée à côté du camion, à plus de 10 mètres, afin de ne pas nuire à l'évaluation des intervenants. Le niveau sonore de l'alarme a été ajusté afin d'assurer une bonne audibilité sur une distance de 10 mètres à l'arrière du camion. Les signaux étaient pulsés et les durées "ON" et "OFF" étaient de 400 msec. Ce choix sera discuté lors de la présentation des résultats.

Chacune des 5 alarmes a été présentée aléatoirement à deux reprises. Une sélection des meilleures alarmes a été faite et présentée de nouveau afin d'établir un consensus autour d'une alarme en particulier. Le consensus n'a pu être atteint. Une discussion a donc suivi la démonstration. Le choix de chacun des participants, les raisons de leur sélection ainsi que leurs réponses au questionnaire ont été recueillis. Un tour de table a été fait tout en évitant de donner des indices théoriques ou de transmettre des résultats des simulations qui auraient pu biaiser les réponses des participants. Les résultats sont présentés à la section 12.3.

11.7 Perception des alarmes de recul par les travailleurs atteints de surdité professionnelle: simulations avec Détectson^{MD}

Suite aux simulations et aux essais terrain, il est primordial de s'assurer que l'alarme de recul retenue rencontre les critères énumérés à la section 11.1, surtout pour les travailleurs atteints de surdité professionnelle. Pour ce faire, le logiciel Détectson^{MD} (Laroche et al., 1991) a été utilisé. Ce logiciel prend en compte le spectre du bruit ambiant, le port de protecteurs auditifs et les capacités auditives des receveurs lors de ses calculs. Des simulations ont été menées en optant pour les caractéristiques suivantes:

1) Bruit ambiant. Un bruit ambiant comportant un spectre dont la pente est d'environ -5 dB/octave (Royster & Stephenson, 1976; ANON, 1973) et un niveau global représentatif des types de bruits ambiants retrouvés sur les chantiers de construction (Legris et al., 1990) ont été utilisés. Le niveau global retenu est de 90 dBA. Des niveaux supérieurs, soit d'environ 95-100 dBA, sont possibles pour certains postes de travail. Pour respecter le Règlement relatif à la qualité du milieu de travail (1994), un niveau de 90 dBA est jugé plus pertinent. Il est important de noter que si les niveaux de pression sonore derrière les véhicules sont souvent supérieurs à 90 dBA, il est alors difficile d'ajuster le niveau sonore d'une alarme de recul qui assure sa détection et sa reconnaissance sans provoquer de réaction de sursaut ou contribuer au risque d'atteinte à l'audition.

2) Port de protecteurs auditifs. Deux types de protecteurs auditifs ont été retenus pour les simulations avec Détectson^{MD}. Il s'agit des bouchons EAR et des serre-têtes Peltor H7A. Ces deux types de protecteurs sont comparables à ceux utilisés fréquemment sur les chantiers. L'atténuation des deux types de protecteurs est présentée aux tableaux 3 et 4. Il est important de noter que le logiciel Détectson^{MD} utilise l'atténuation du manufacturier. Cela signifie que l'atténuation est celle mesurée en laboratoire. Cette atténuation est rarement atteinte sur le terrain; elle est plutôt de 10 à 15 dBA. Afin de prédire la perception des alarmes de recul de façon convenable, les simulations avec Détectson^{MD} utilisent les atténuations de laboratoire, car il est possible que certains travailleurs puissent bénéficier d'une telle atténuation. L'analyse de l'alarme de recul retenue à la section 5 ne devrait pas être influencée par l'utilisation de l'atténuation du manufacturier. En effet, l'atténuation est plus marquée en hautes fréquences qu'en basses fréquences pour la majorité des protecteurs auditifs sur le marché. Si le contenu fréquentiel de l'alarme ne comporte pas de composantes supérieures à 1,5 kHz, la perception de l'alarme est moins compromise par le port de protecteurs auditifs ou par les seuils d'audition des travailleurs atteints de surdité professionnelle (Héту, 1995).

3) Capacités auditives des travailleurs. Deux degrés de perte auditive ont été retenus pour l'analyse: soit un groupe d'hommes de 55 ans ayant une audition normale pour leur âge (stade 0) et un autre groupe d'hommes de 55 ans souffrant de surdité professionnelle indemnisable (stade 4). Les seuils respectifs de ces deux groupes sont présentés aux tableaux 5 et 6. Les résultats des simulations avec Détectson^{MD} sont présentés à la section 12.4

Tableau 3 Atténuation des bouchons EAR.

Fréquence (Hz)	Atténuation (dBA)
63	24
125	24
250	26
500	26
1000	32
2000	34
4000	39
8000	36

Tableau 5 Seuils d'audition d'hommes de 55 ans avec une audition normale pour l'âge (stade 0).

Fréquence (Hz)	Atténuation (dBHL)
125	0
250	5
500	5
1000	6
2000	8
3000	16
4000	22
6000	25
8000	30

Tableau 4 Atténuation des serre-têtes Peltor H7A

Fréquence (Hz)	Atténuation (dBA)
63	14
125	13
250	21
500	27
1000	36
2000	32
4000	33
8000	33

Tableau 6 Seuils d'audition d'hommes de 55 ans avec une surdité professionnelle indemnisable (stade 4).

Fréquence (Hz)	Atténuation (dBHL)
125	0
250	5
500	5
1000	25
2000	35
3000	55
4000	70
6000	75
8000	80

12.0 RÉSULTATS

Les mesures se sont déroulées en deux parties: comparaison avec les simulations et expérimentation avec d'autres combinaisons fréquentielles. Chaque véhicule a été mesuré pour deux positions d'alarme différentes. Pour chaque position d'alarme, les 2 combinaisons fréquentielles correspondant aux simulations, soit 3 et 4 fréquences, ont d'abord été mesurées. Ensuite, d'autres combinaisons fréquentielles ont été mesurées, soit 6 fréquences ou un balayage en fréquences, ce qui fait de 4 à 8 séries de mesures pour chaque véhicule. Le tableau 7 résume les différentes combinaisons pour chaque véhicule. Les résultats des mesures et des simulations ne sont présentés en détails dans ce rapport. Pour plus de détails, le lecteur est invité à consulter le rapport déposé à l'IRSST (Lefebvre et Laroche, 1995).

Tableau 7 Les différents montages d'alarme.

Véhicule	Montage	Position	Contenu fréquentiel de l'alarme
Camion à benne	1	1	1000 Hz 1150 Hz 1300 Hz
	2	1	1200 Hz 1300 Hz 1400 Hz 1500 Hz
	3	2	1050 Hz 1250 Hz 1450 Hz
	4	2	1350 Hz 1550 Hz 1650 Hz 1800 Hz
	5	1	balayage 1125-1625 Hz
	6	2	balayage 1175-1675 Hz

Tableau 7 Les différents montages d'alarme (suite).

Véhicule	Montage	Position	Contenu fréquentiel de l'alarme
Chargeur	1	1	1000 Hz 1200 Hz 1350 Hz
	2	1	1000 Hz 1400 Hz 1500 Hz 1600 Hz
	3	2	1000 Hz 1250 Hz 1500 Hz
	4	2	1250 Hz 1600 Hz 1800 Hz 2000 Hz
	5	1	balayage 1100-1575 Hz
	6	1	1000 Hz 1200 Hz 1300 Hz 1400 Hz 1500 Hz 1625 Hz
	7	2	balayage 1175-1700 Hz

Tableau 7 Les différents montages d'alarme (suite).

Véhicule	Montage	Position	Contenu fréquentiel de l'alarme
Niveleuse	1	1	1500 Hz 1590 Hz 1670 Hz
	2	1	1200 Hz 1290 Hz 1370 Hz 1450 Hz
	3	2	1000 Hz 1150 Hz 1300 Hz
	4	2	1300 Hz 1450 Hz 1600 Hz 1750 Hz
	5	1	balayage 1075-1520 Hz
	6	1	1340 Hz 1425 Hz 1490 Hz 1525 Hz 1600 Hz 1700 Hz
	7	2	balayage 1150-1600 Hz
	8	2	1000 Hz 1150 Hz 1300 Hz 1375 Hz 1450 Hz 1775 Hz

12.1 Simulations vs mesures in-situ

En général, l'écart entre les simulations et les mesures in-situ est inférieur à 10 dBA, il est même souvent inférieur à 5 dBA. En acoustique, de tels écarts peuvent être jugés très bons. Dans ce cas-ci, l'écart peut s'expliquer par le fait que les simulations ne tiennent compte que de l'énergie de deux ondes, directe et réfléchie. L'alarme de recul génère, quant à elle, une multitude d'ondes directes et réfléchies.

Sur la base des mesures effectuées à 2 et 4 mètres, les plus grandes disparités se produisent au début et à la fin d'une mesure. À ces endroits, l'angle entre l'alarme de recul et le receveur est très grand (environ 45°) et à cause de la directivité de l'alarme, il est très difficile de prévoir le niveau sonore. Lorsque les mesures sont prises en s'éloignant du véhicule, les plus grandes disparités se produisent entre 0 et 1 mètre. À cette distance, il y a souvent une grande diffraction de l'onde directe et un grand angle de réflexion pour l'onde indirecte (onde réfléchie).

Aucune simulation n'a été faite pour les alarmes contenant 6 fréquences ou celles générant un balayage en fréquences. Le signal généré par ces alarmes était trop différent de celui auquel les travailleurs sont habitués.

12.2 Évaluation des alarmes au niveau de la propagation sonore

Pour interpréter les résultats, il faut évaluer la capacité d'une alarme à générer un niveau sonore uniformément décroissant. Il faut donc éviter les diminutions brusques et importantes (plus de 5 dB) du niveau de pression sonore, tel que prouvé lors de la phase II du projet (Laroche et al., 1993). La figure 14 montre un exemple de diminutions brusques et importantes du niveau sonore, soit plus de 15 dB. Cet exemple est tiré des mesures prises lors de la phase II.

Le tableau 8 permet de vérifier la qualité du champ de propagation d'une alarme, selon son contenu fréquentiel et son montage sur le véhicule. Dans ce tableau, chaque véhicule et chaque montage sont présentés avec le nombre d'interférences acoustiques entre 4 et 7 dB et celles de plus de 8 dB. À noter qu'aucune interférence de plus de 11 dB n'a été observée, ce qui est une nette amélioration en comparaison des alarmes testées lors de la phase II du projet où il y avait plusieurs interférences acoustiques entre 10 et 20 dB, voire même jusqu'à 25 dB. Le nombre d'interférences par m² donne aussi une bonne idée de la qualité de l'alarme. Ce nombre est calculé comme suit:

pour le camion à benne:

$$\text{interférences par m}^2 = \frac{(\text{somme des interférences}) \cdot 11/7}{42 \text{ m}^2}$$

pour le chargeur et la niveleuse:

$$\text{interférences par m}^2 = \frac{(\text{somme des interférences})}{42 \text{ m}^2}$$

note: il y a 42 m² à l'arrière des véhicules et le camion comportait 7 axes de mesures comparativement à 11 pour le chargeur et la niveleuse. Le terme 11/7 représente donc le rapport entre les séries de mesure.

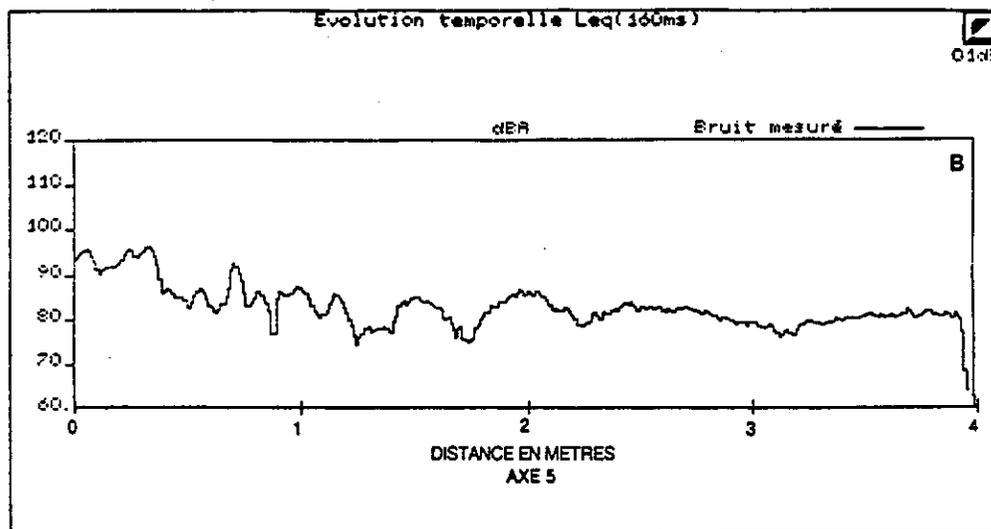


Figure 14 Niveau de pression acoustique d'une alarme en fonction de la distance à l'arrière d'un véhicule.

Les montages ayant moins de 10 interférences entre 4 et 7 dB peuvent être considérés comme sécuritaires. En effet, en observant les résultats de mesure aux figures 15 à 20, il est facile de constater que ces interférences ne sont pas brusques, mais se présentent de façon graduelle. Elles sont donc à peine perceptibles à l'oreille. En contrepartie, les montages ayant plus de 10 interférences entre 4 et 7 dB ou plus de 2 interférences égales ou supérieures à 8 dB ou plus peuvent être considérés comme non sécuritaires (figures 21 à 24).

Tableau 8 Nombre d'interférences acoustiques en fonction du montage.

Véhicule	Montage	Position	Nombre de fréquence	Nombre d'interférences entre 4 et 7 dB	Nombre d'interférences de plus de 8 dB	Nombre d'interférences par m ²
Camion à benne	1	1	3	12	2	0.52
	2	1	4	9	3	0.45
	3	2	3	11	0	0.41
	4	2	4	2	0	0.07
Chargeur	1	1	3	15	5	0.48
	2	1	4	9	0	0.21
	3	2	3	6	0	0.14
	4	2	4	2	0	0.05
Niveleuse	1	1	3	15	1	0.38
	2	1	4	1	1	0.05
	3	2	3	4	0	0.10
	4	2	4	3	0	0.07

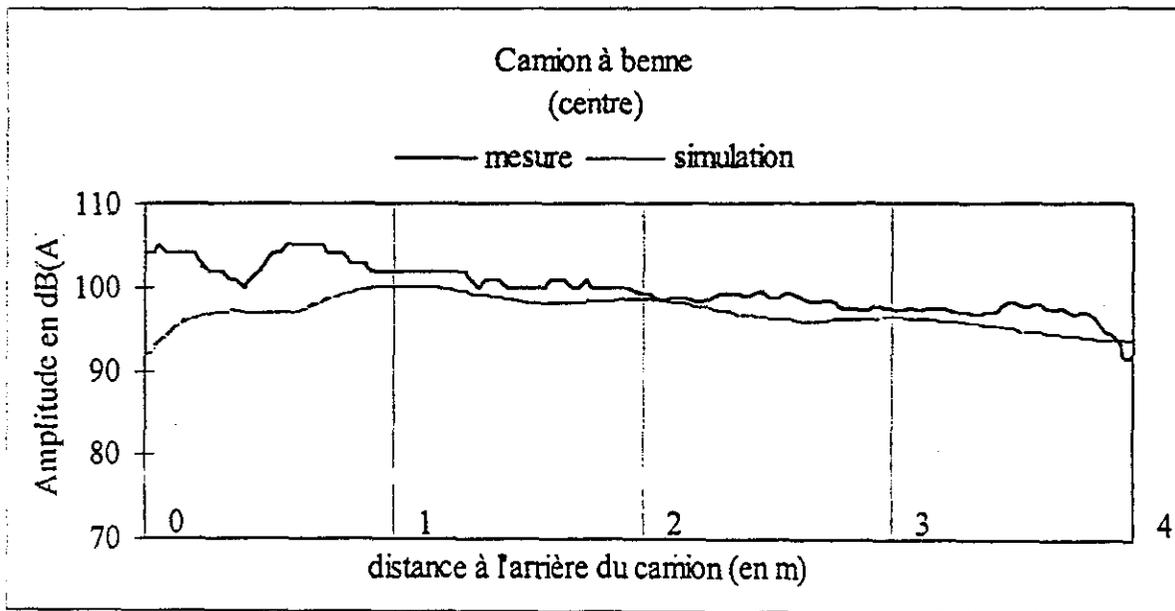


Figure 15 Niveau de pression sonore au centre, en s'éloignant du camion, montage 4.

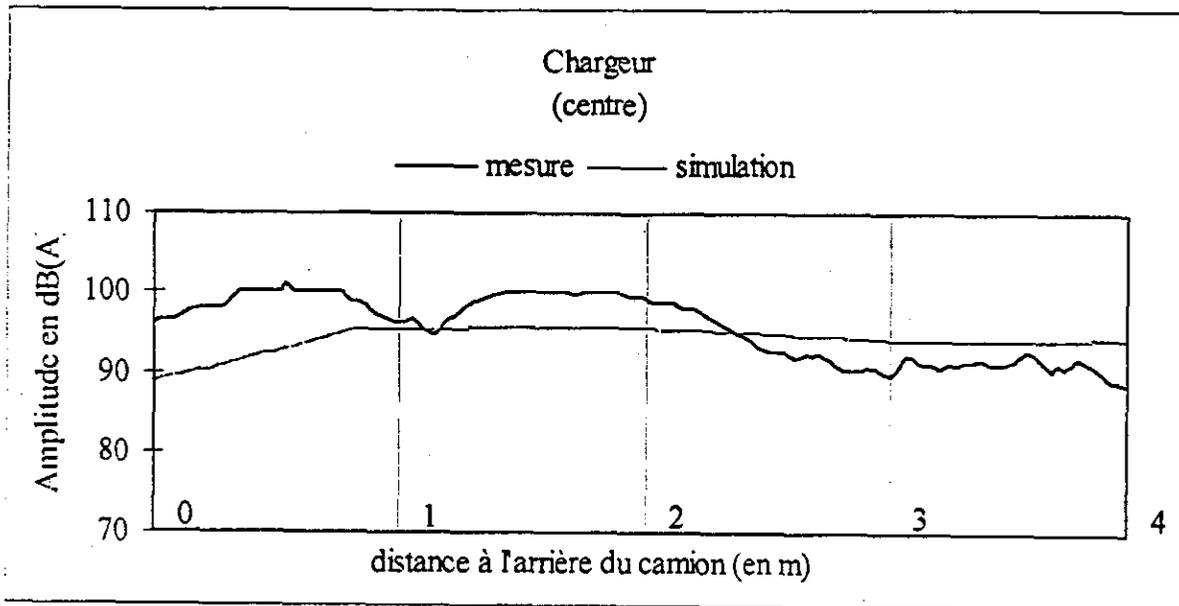


Figure 16 Niveau de pression sonore au centre, en s'éloignant du chargeur, montage 3.

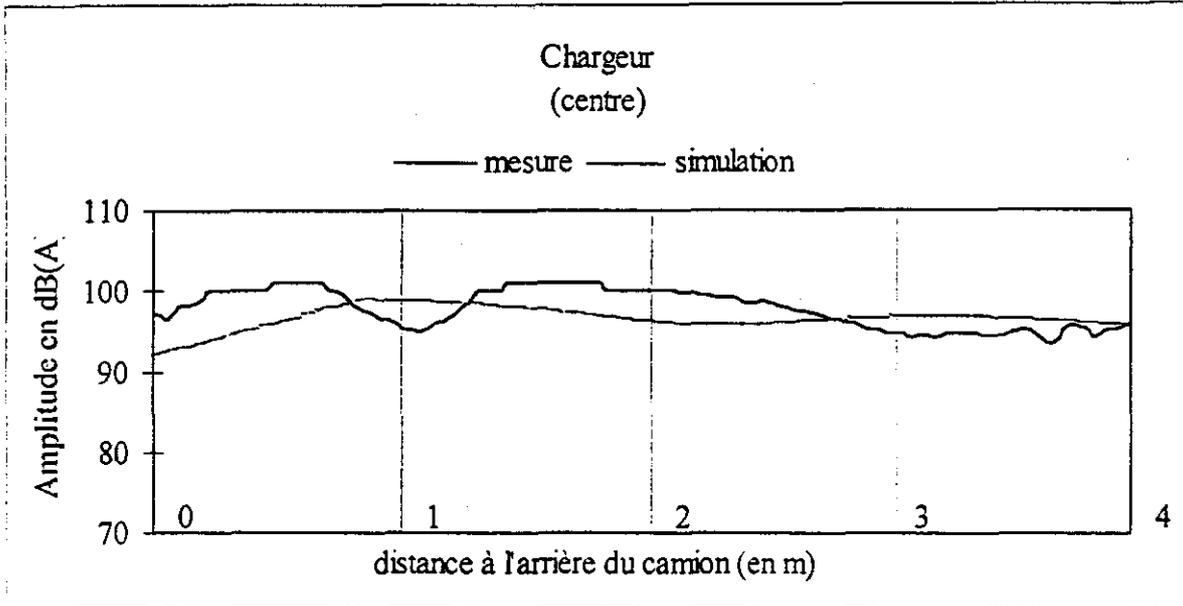


Figure 17 Niveau de pression sonore au centre, en s'éloignant du chargeur, montage 4.

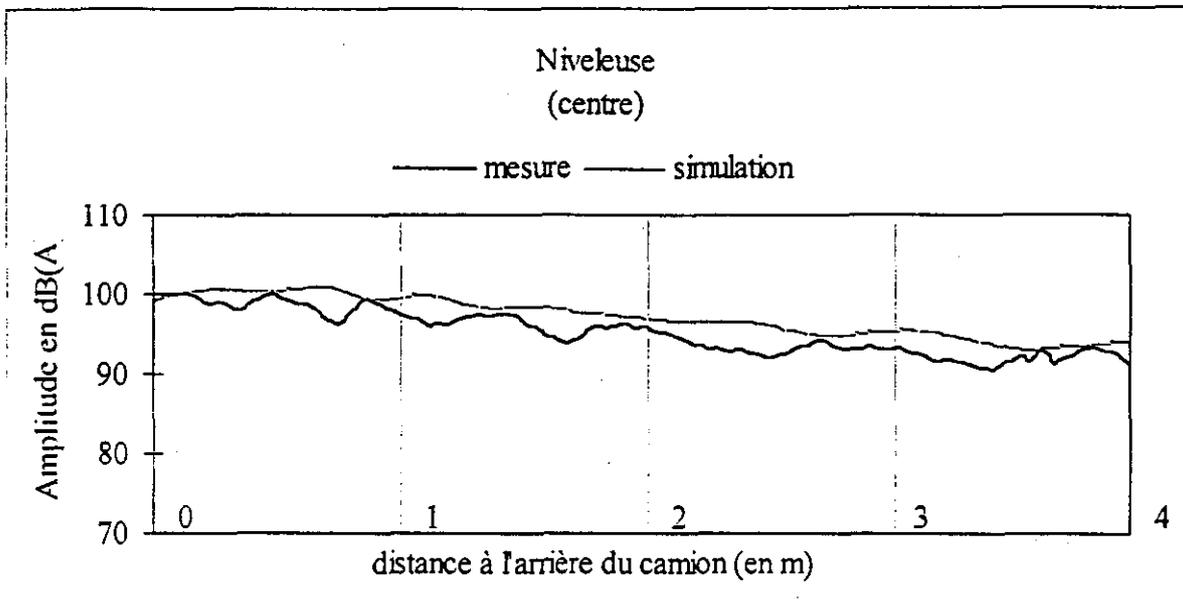


Figure 18 Niveau de pression sonore au centre, en s'éloignant de la niveleuse, montage 2.

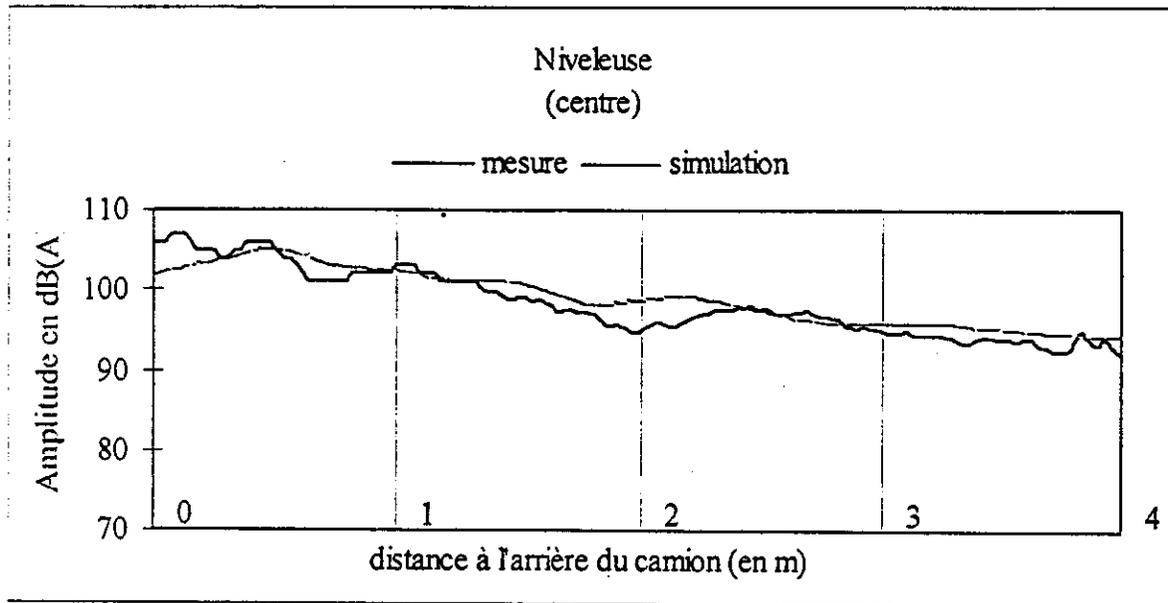


Figure 19 Niveau de pression sonore au centre, en s'éloignant de la niveleuse, montage 3.

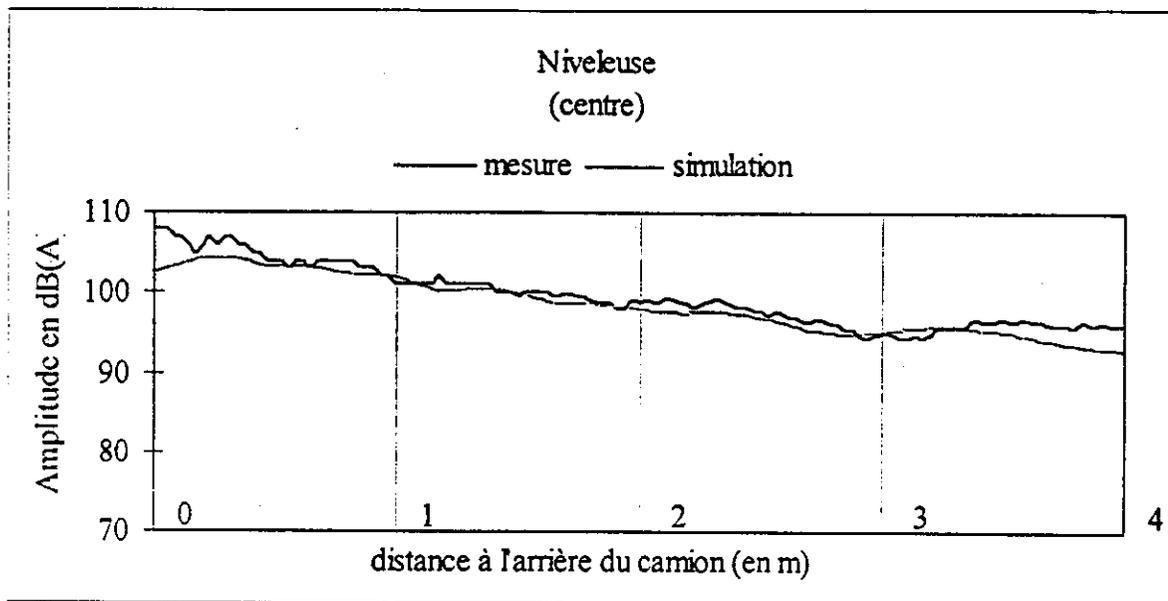


Figure 20 Niveau de pression sonore au centre, en s'éloignant de la niveleuse, montage 4.

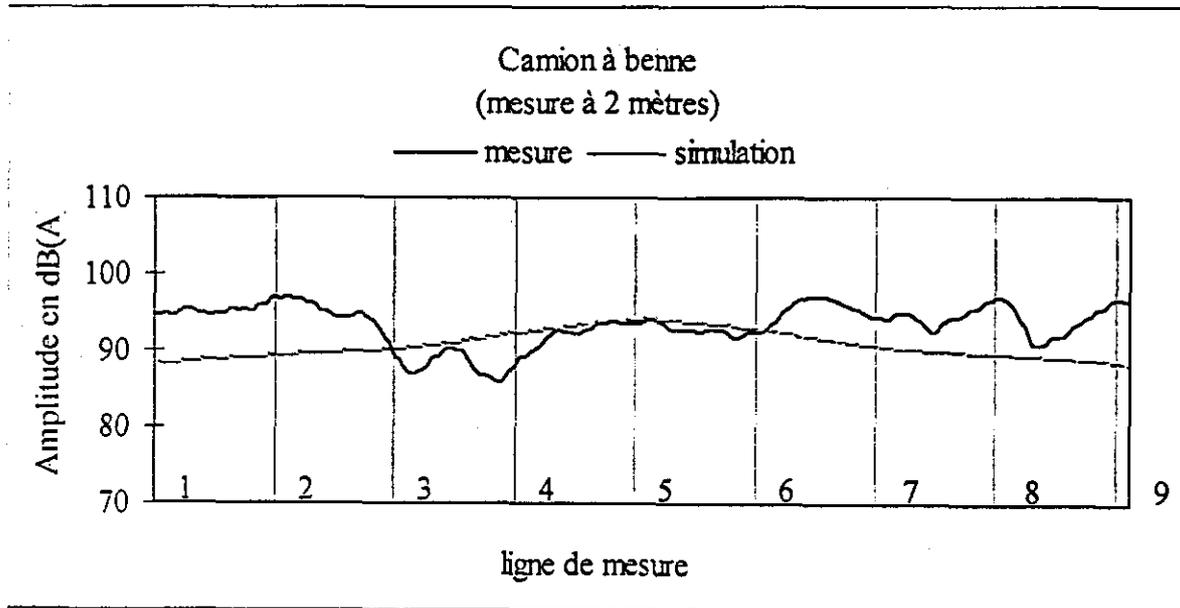


Figure 21 Niveau de pression sonore à 2 mètres, à l'arrière du camion, montage 1.

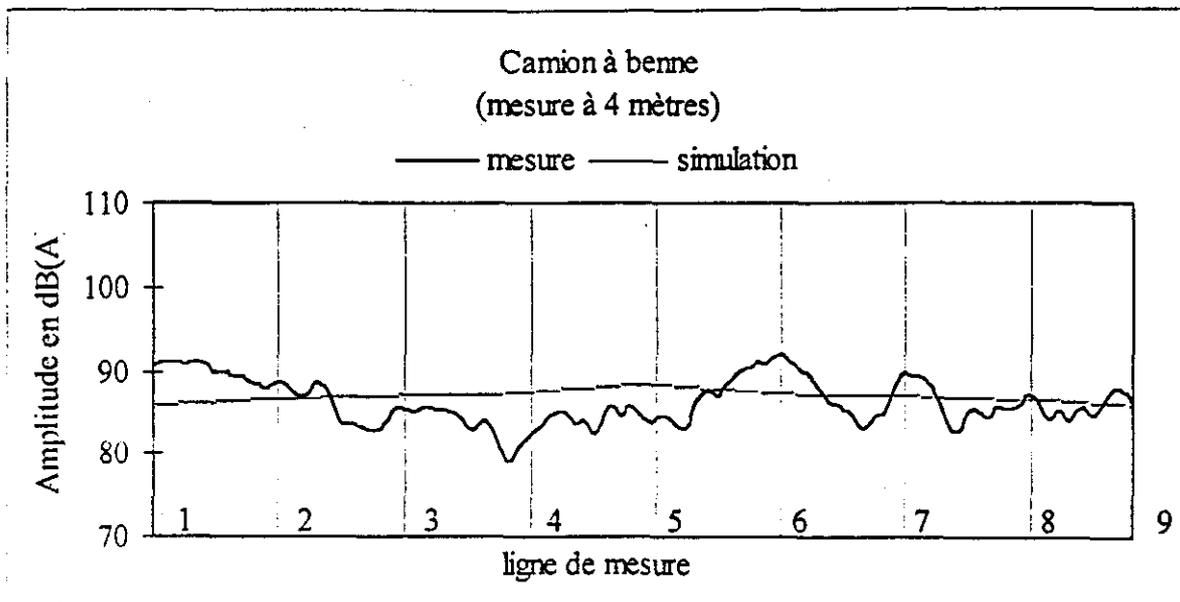


Figure 22 Niveau de pression sonore à 4 mètres, à l'arrière du camion, montage 2.

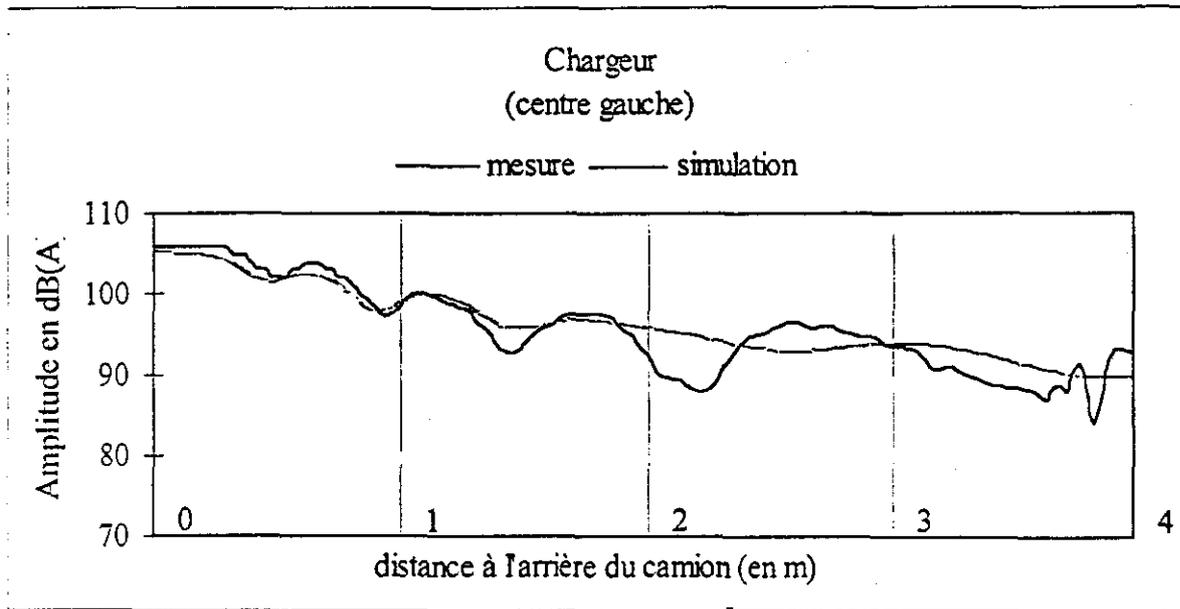


Figure 23 Niveau de pression sonore au centre gauche, en s'éloignant du chargeur, montage 1.

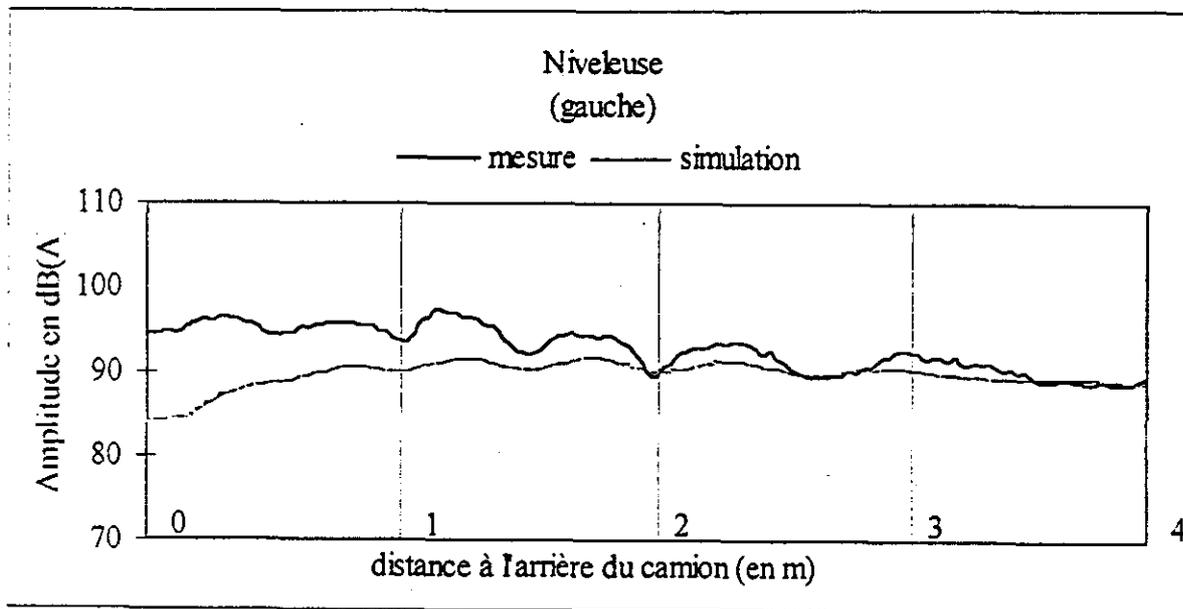


Figure 24 Niveau de pression sonore à gauche, en s'éloignant de la niveleuse, montage 1.

12.3 Évaluation des alarmes par des utilisateurs

Tel que précisé à la section 11.6, les intervenants du secteur de la construction n'ont pas été influencés par les données théoriques, les résultats des simulations avec le logiciel ALARME ou par les mesures terrain. Lors de la discussion, un des participants n'a pas remis son questionnaire. Le tableau 9 présente la répartition des votes des participants quant à leurs choix d'alarmes.

Tableau 9 Répartition des choix d'alarmes des participants à la validation.

Alarme	Contenu fréquentiel	Résultat terrain	Nombre de votes
1	alarme du véhicule	médiocre	2
2	1000, 1150, 1300 Hz	bon	4
3	1000, 1400, 1500, 1600 Hz	bon	1
4	1300, 1450, 1650, 1750 Hz	médiocre	0
5	1000, 1200, 1300 Hz	médiocre	3

Il est à noter que le nombre de votes dépasse 7, car trois des participants ont choisi 2 alarmes. Deux d'entre eux préféreraient l'alarme du véhicule puisqu'ils se disaient habitués à ce type de signal. Le troisième hésitait entre les alarmes 2 et 5, soit des alarmes comportant 3 fréquences. Les alarmes de 4 fréquences ont été peu populaires auprès des participants à cause de leur "tonalité trop agressive".

Après avoir transmis les données théoriques concernant les patrons de propagation sonore et les résultats des essais terrain aux participants, ces derniers ont opté pour l'alarme 2, l'alarme 5 générant un plus grand nombre d'interférences acoustiques.

À la question portant sur le phénomène d'habituation, les participants ont répondu que le fait de changer la tonalité de l'alarme ne modifierait pas le comportement des travailleurs. Ces derniers ont tendance à ignorer le signal des alarmes de recul. Cette question mériterait d'être approfondie par des spécialistes en ergonomie, en hygiène industrielle et en acoustique. Le présent projet ne visait pas à résoudre ce problème particulier, mais devait s'assurer que le choix de nouveaux paramètres acoustiques n'accentuerait pas ce phénomène. Le choix d'une alarme à trois composantes fréquentielles, en remplacement des alarmes actuelles ne contenant qu'une fréquence, ne devrait pas amplifier ce comportement. Par ailleurs, plusieurs intervenants ont mentionné le besoin de mettre l'accent sur l'organisation du travail sur les chantiers, afin de limiter les déplacements de travailleurs derrière les véhicules ou du moins sur les mêmes voies que ces véhicules.

Des commentaires généraux ont aussi été apportés et méritent d'être présentés. Certains participants ont mentionné qu'il ne fallait pas que l'alarme comporte trop de tonalités graves, car le bruit ambiant des chantiers de construction comporte beaucoup de basses fréquences.

Sur les chantiers de construction, le recul de véhicules lourds représente une manoeuvre dangereuse, surtout à cause du bruit ambiant élevé. L'alarme de recul doit attirer l'attention des travailleurs sur ce danger. Les participants convenaient que les travailleurs doivent bouger rapidement dans de telles situations. Par contre, le niveau d'urgence véhiculé par l'alarme ne doit pas être excessif selon leurs dires. Ce commentaire est venu appuyer le choix de la durée de 400 msec entre les pulses. En effet, Patterson (1982) suggère une durée inférieure à 200 msec pour les situations d'urgence et de plus de 300 msec pour les situations moins urgentes. Avec les alarmes de recul, il faut faire un compromis entre le degré d'urgence et le degré d'inconfort ressenti à l'égard du signal d'alarme. Ce signal apparaît plusieurs fois par jour sur les chantiers de construction. La norme SAE J994 (1985) suggère de 1 à 2 pulses par seconde. Le choix de 400 msec s'avère donc un compromis intéressant.

Certains participants ont indiqué que le fait de placer l'alarme près des phares arrières assurerait peut-être un meilleur entretien de celle-ci, puisque les opérateurs de véhicules lourds doivent nettoyer régulièrement leurs phares. Par le fait même, ils pourraient nettoyer l'alarme qui risque souvent de s'encrasser.

Enfin, les participants ne croient pas à la nécessité d'avoir des catégories d'alarmes selon le type de véhicules lourds. Cette option ne ferait qu'accentuer la cacophonie déjà rapportée par les travailleurs et les employeurs.

12.4 Simulations avec Détectson^{MD}

Les figures 25 à 30 démontrent que l'alarme comprenant des composantes fréquentielles entre 1000 et 1300 Hz, avec un niveau de 95 dBSPL chacune, rencontre les critères d'audibilité et de reconnaissance pour l'ensemble des sujets. Le fait que les travailleurs soient atteints de surdité professionnelle indemnisable ou non et qu'ils portent ou non des protecteurs auditifs n'affecte pas significativement les résultats obtenus avec ces caractéristiques acoustiques.

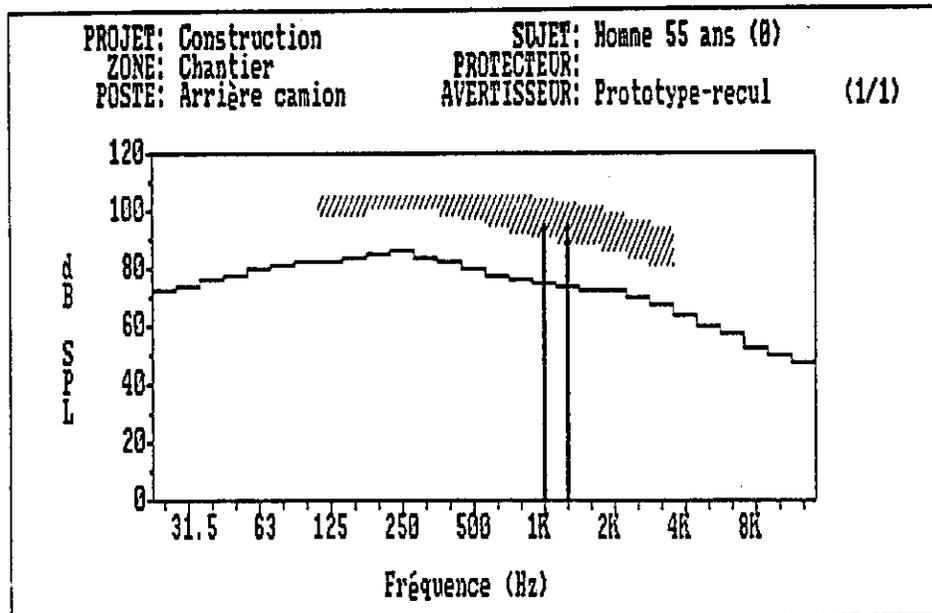


Figure 25 Fenêtre de conception d'une alarme de recul comportant des composantes entre 1000 et 1250 Hz pour des hommes de 55 ans avec une audition normale (stade 0).

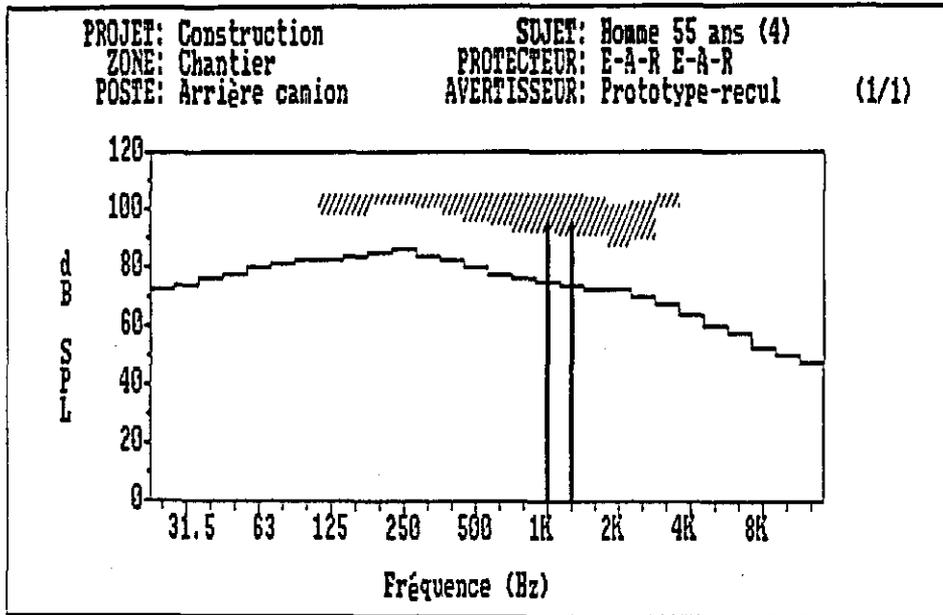


Figure 28 Fenêtre de conception d'une alarme de recul comportant des composantes entre 1000 et 1250 Hz pour des hommes de 55 ans avec une surdité professionnelle indemnisable (stage 4) et portant des bouchons EAR.

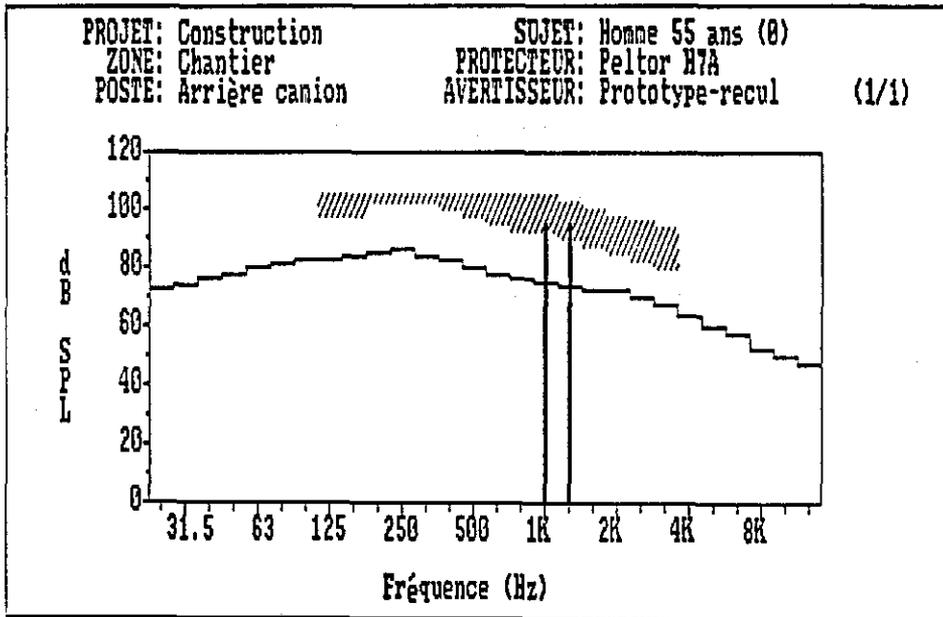


Figure 29 Fenêtre de conception d'une alarme de recul comportant des composantes entre 1000 et 1250 Hz pour des hommes de 55 ans avec une audition normale (stage 0) et portant des serre-têtes Peltor H7A.

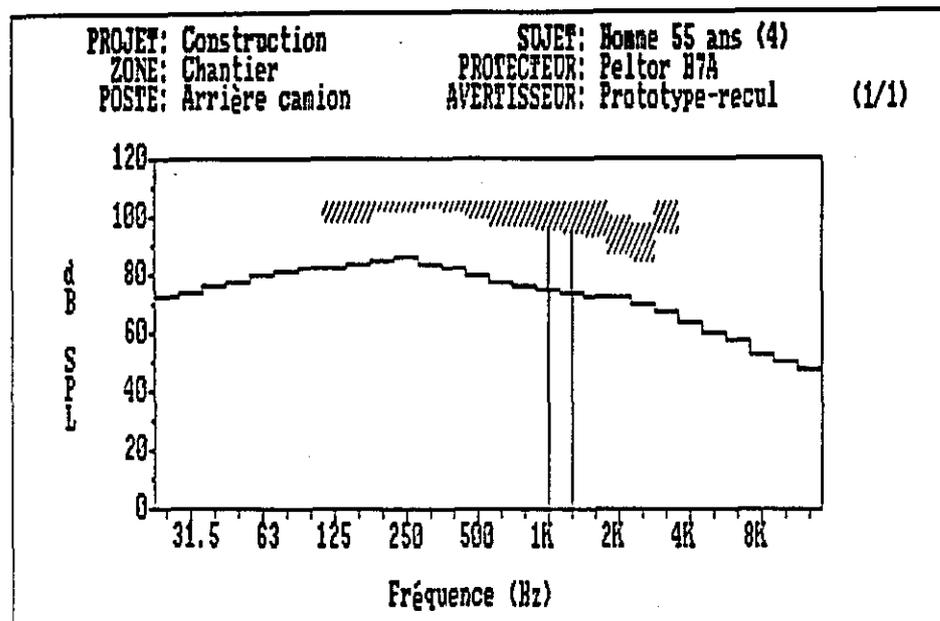


Figure 30 Fenêtre de conception d'une alarme de recul comportant des composantes entre 1000 et 1250 Hz pour des hommes de 55 ans avec une surdité professionnelle indemnisable (stade 4) et portant des serre-têtes Peltor H7A.

Aux figures 25 à 30, deux composantes apparaissent alors que les simulations à l'aide du logiciel ALARME préconisent 3 composantes. Le logiciel Détectson^{MD} prend seulement en compte les bandes de tiers d'octave. Les bandes de tiers d'octave sont centrées à 1000 et 1250 Hz dans cette zone fréquentielle. Il n'est donc pas possible d'entrer les trois valeurs de 1000, 1150 et 1300 Hz. On peut toutefois aisément constater que si la troisième composante de 95 dB SPL était ajoutée, elle se situerait dans l'intervalle de la fenêtre de conception. Ainsi, les résultats obtenus par simulation avec le logiciel ALARME, confirmés par les mesures terrain, sont appuyés par le logiciel Détectson^{MD}. La question de la localisation auditive n'est pas prise en compte dans cette section, mais sera discutée à la section 13.3.

13.0 DISCUSSION

13.1 Paramètres acoustiques optimaux des alarmes de recul

Les résultats montrent qu'il est possible d'avoir une alarme de recul générant un champ sonore presque uniformément décroissant à l'arrière d'un véhicule lourd. En choisissant un contenu fréquentiel de 3 ou 4 fréquences, qui respecte certains critères de base (voir section 12.1), cet objectif devient réalisable. Le tableau 10 présente les meilleurs choix d'alarmes. Les montages testés comportaient des interférences acoustiques, mais elles étaient espacées sur une distance d'environ 1 mètre. De plus, leur amplitude est faible: moins de 5 dB. La perception du signal et la localisation de l'alarme par le travailleur devraient être facilitées rendant ainsi la manoeuvre de recul plus sécuritaire.

Tableau 10 Meilleures alarmes.

Véhicule	Montage	Fréquence
Camion à benne	4	1350 Hz 1550 Hz 1650 Hz 1800 Hz
Chargeur	3	1000 Hz 1250 Hz 1500 Hz
	4	1250 Hz 1600 Hz 1800 Hz 2000 Hz
Niveleuse	2	1200 Hz 1290 Hz 1370 Hz 1450 Hz
	3	1000 Hz 1150 Hz 1300 Hz
	4	1300 Hz 1450 Hz 1600 Hz 1750 Hz

De façon générale, les alarmes ayant 4 fréquences sont meilleures que celles ayant 3 fréquences: elles possèdent moins d'interférences acoustiques pour une position identique. Les alarmes ayant 6 fréquences ont moins d'interférences acoustiques, mais aucune amélioration significative n'a été mesurée en comparaison des alarmes à 4 fréquences. Il est important de mentionner que les combinaisons de fréquences qui s'avèrent les meilleures ne comportent pas de liens harmoniques entre elles, c'est-à-dire que les composantes ne sont pas des multiples d'une même fréquence fondamentale (sauf pour le montage 3, Tableau 10). Si tel était le cas, les patrons d'interférences ne seraient pas significativement améliorés.

Les alarmes générant un balayage en fréquences peuvent aussi être efficaces. Par contre, la localisation de l'alarme par un travailleur est difficile à cause de la perpétuelle variation du contenu fréquentiel. De plus, ce type de signal n'est généralement pas associé à une alarme de recul.

13.2 Emplacement des alarmes de recul

La position de l'alarme est également un paramètre important. Les mesures ont démontré que les alarmes en position 2 comportent moins d'interférences acoustiques que celles en position 1. Les alarmes, lorsqu'elles sont en position 2, sont visibles par une personne à l'arrière du véhicule peu importe l'endroit où elle se place, ce qui veut dire qu'il n'y a pas d'obstacle entre la source et le receveur, donc pas de diffraction importante pour les ondes directes. Les alarmes, lorsqu'elles sont en position 1, ne sont pas toujours visibles. Il y a un ou des obstacles entre la source et le receveur. Les ondes sonores n'arrivent donc pas directement au receveur, mais elles sont diffractées.

13.3 Perception des alarmes de recul par les travailleurs atteints de surdité professionnelle

À la section 13.1, le tableau 10 présente les meilleures alarmes de recul en fonction des véhicules. Ce tableau ne tient compte que de l'aspect propagation sonore. Aux sections 12.3 et 12.4, il est apparu que l'alarme comportant les fréquences de 1000, 1150 et 1300 Hz, avec des durées "ON" et "OFF" de 400 msec et un niveau de 95 dBSPL par composante, semblait le meilleur choix à bien des égards. Les raisons motivant ce choix méritent d'être reprises.

- 1) Il faut prendre en compte le phénomène de surdité professionnelle qui touche une proportion importante de travailleurs et qui se manifeste plus particulièrement aux fréquences supérieures à 2000 Hz.
- 2) Il faut prendre en compte le port de protecteurs auditifs dont l'atténuation est souvent plus marquée aux fréquences supérieures à 2000 Hz.
- 3) Il faut s'assurer que le contenu fréquentiel de l'alarme ne se perd pas dans le bruit de fond souvent composé de basses fréquences sur les chantiers de construction;
- 4) Il faut prendre en compte les limites techniques de génération des signaux sonores de large spectre par les haut-parleurs couramment utilisés par les manufacturiers d'alarme de recul. La réponse optimale se situe à 1000 Hz pour plusieurs haut-parleurs et la directivité est relativement importante pour les hautes fréquences.
- 5) Il faut s'assurer que l'alarme peut être localisée dans l'espace par les travailleurs.
- 6) Il faut s'assurer que l'alarme est visible lorsque l'on se situe à 1 mètre ou plus à l'arrière d'un véhicule lourd. Cette condition ne pose pas de problème pour les chargeurs et les niveleuses sur lesquelles les alarmes peuvent être placées, par exemple, derrière le grillage arrière. Pour le camion à benne, l'alarme doit être encastrée dans le châssis arrière où sont localisés les phares arrière.
- 7) Il faut prendre en compte le nombre de signaux d'alarme de recul présents sur les chantiers de construction. Pour ne pas accentuer la cacophonie déjà rapportée par les travailleurs et les employeurs, il faut éviter d'avoir des tonalités d'alarmes différentes selon le type de véhicules.

13.4 Révision du règlement 3.10.12 du Code de sécurité pour les travaux de construction

Les conditions émises ci-haut permettent maintenant d'orienter la révision de l'article 3.10.12 du Code de sécurité pour les travaux de construction (1994). Entre autres, ce règlement ne peut plus référer seulement à la norme SAE J994 qui préconise l'utilisation de tons purs. Les modifications proposées concernent principalement le spectre de l'alarme qui doit comporter au moins trois composantes, soit 1000, 1150 et 1300 Hz, ainsi qu'un niveau de pression sonore se situant autour de 95 dB SPL par composante. Lorsque les composantes sont additionnées ensemble, le niveau global doit se situer autour de 100 dBA. Pour certaines situations propres aux chantiers de construction, ce niveau pourrait même s'avérer trop élevé. Une étude plus approfondie des types de bruit ambiant retrouvés sur les chantiers de construction devrait être réalisée afin de déterminer si un ou plusieurs niveaux sonores doivent être recommandés.

Quant à la localisation auditive de l'alarme, il est reconnu que les signaux de basses fréquences et de hautes fréquences sont plus faciles à localiser que les signaux sonores compris entre 1500 et 3000 Hz (Laroche, 1994). En choisissant des composantes entre 1000 et 1300 Hz, les auteurs de ce rapport sont conscients qu'il ne s'agit pas du meilleur choix pour assurer la localisation auditive. Idéalement, il aurait fallu choisir des composantes de plus basses fréquences. Les fréquences supérieures à 3000 Hz doivent être d'emblée rejetées à cause de la prévalence de la surdité professionnelle et de l'atténuation des protecteurs auditifs. Étant donné les circonstances énumérées plus haut, il s'avère que l'alarme proposée représente un compromis très acceptable pour améliorer le patron de propagation sonore derrière les véhicules et du même coup l'audibilité, la reconnaissance et la localisation auditive de ce type de signal. Avant d'opter définitivement pour ce type de signal, quelques essais de localisation auditive en laboratoire devraient être réalisés afin de s'assurer qu'il répond à des normes acceptables. En plus du contenu spectral, le choix de 400 msec comme durée des pulses pourrait être validé. Cette durée est courte et ne permet pas d'utiliser au maximum le mouvement de la tête pour faciliter la localisation. Par ailleurs, cette durée ne peut pas être prolongée de beaucoup, car il est reconnu qu'un signal pulsé de courte durée est plus facile à détecter, attire plus facilement l'attention et est plus facile à reconnaître (Patterson, 1982). Enfin, l'effet des protecteurs auditifs sur la localisation auditive mérite d'être approfondi davantage. Les quelques résultats disponibles semblent démontrer un problème majeur concernant les erreurs de localisation avant-arrière (Hétu, 1995).

14.0 CONCLUSION DE LA TROISIÈME PARTIE

Ce dernier volet d'une étude exhaustive portant sur la propagation sonore des alarmes de recul derrière les véhicules lourds avait pour but de mettre au point un simulateur d'alarme de recul qui assurerait une meilleure sécurité des travailleurs sur les chantiers de construction. Le projet visait aussi à fournir des éléments qui permettent la révision de l'article 3.10.12 du Code de sécurité pour les travaux de construction (1994).

Le simulateur d'alarme de recul a été mis au point par la firme DAP Électronique Canada Ltée, spécialisée dans la conception d'alarme de recul. Ce simulateur permet de générer différents types de signaux sonores dont on peut contrôler le contenu spectral, le niveau et la durée. Des contraintes techniques, telles que la directivité et la réponse fréquentielles des haut-parleurs, ont dû être prises en compte. Par ailleurs, les caractéristiques acoustiques du simulateur devaient rencontrer les exigences reliées à la perception auditive, plus précisément à la capacité de détection, de reconnaissance et de localisation du système auditif du sujet avec une audition normale ou atteint de surdité professionnelle, portant ou non des protecteurs auditifs. En combinant les contraintes et exigences mentionnées plus haut, les caractéristiques acoustiques que le simulateur permet de générer sont les suivantes: 6 générateurs indépendants dont le contenu spectral peut varier entre 500 et 3500 Hz, le niveau de chaque composante pouvant atteindre 107 dB(\pm 4 dB), avec une durée de 0 à 1.5 sec pour les signaux de type pulsé et une possibilité de balayage fréquentielle.

Parallèlement à la conception du simulateur d'alarme de recul, des simulations ont été menées à l'aide du logiciel ALARME mis au point lors de la phase précédente (Laroche et al., 1993). Ce logiciel permet de prédire des patrons de propagation sonore à l'arrière de 4 types de véhicules lourds, soit un camion à benne, un chargeur, une niveleuse et une bétonnière. Plusieurs paramètres acoustiques ont été sélectionnés et testés avec le logiciel. Les paramètres devaient encore une fois respecter les contraintes techniques du simulateur ainsi que les capacités auditives nécessaires pour la perception des signaux sonores de danger, tels que les alarmes de recul.

Les simulations ont démontré que les alarmes comportant 3 ou 4 fréquences permettent d'atteindre un patron de propagation ne comportant pas de changement brusque du niveau de pression sonore lorsqu'on s'éloigne graduellement d'un véhicule lourd. Les variations du niveau de pression sont rarement supérieures à 5 dB sur une distance de 1 mètre. Ces variations peuvent atteindre 15 à 20 dB lorsqu'une seule composante fréquentielle est utilisée (Laroche et al., 1993). Les fréquences testées lors des simulations étaient localisées entre 1000 et 2000 Hz. Plusieurs combinaisons de fréquences se sont avérées intéressantes et ont été testées sur le terrain afin d'identifier la combinaison optimale en terme de propagation sonore, mais aussi en terme d'acceptabilité par les utilisateurs.

Les combinaisons de fréquences identifiées par le logiciel ALARME ont été testées sur le terrain sur 3 types de véhicules, soit le camion à benne, le chargeur et la niveleuse. Différentes combinaisons se sont avérées bonnes sur chacun des véhicules. Afin de cerner la meilleure combinaison, une validation a été menée auprès d'utilisateurs potentiels. Il s'agissait d'identifier l'alarme qui avait une tonalité et un champ de pression sonore acceptables pour les 8 participants à cette expérimentation.

Le logiciel ALARME a aussi permis d'étudier l'emplacement optimal des alarmes sur les véhicules. Les résultats démontrent que lorsque l'alarme est visible à l'arrière du véhicule, les interférences acoustiques sont significativement diminuées. La visibilité de l'alarme est donc un facteur important à retenir lors de la révision du Code de sécurité pour les travaux de construction.

Suite à cette validation, il est ressorti qu'un signal pulsé de 400 msec avec une durée inter-pulse de 400 msec, comportant 3 fréquences de 1000, 1150 et 1300 Hz de niveau de 95 dB SPL, s'avère la combinaison la plus appropriée pour remplacer les alarmes de recul existantes. Une vérification avec le logiciel Détectson^{MD} qui prend en compte le niveau de bruit ambiant, les capacités auditives (seuils d'audition et sélectivité fréquentielle) et le port de protecteurs auditifs a confirmé le choix de ces paramètres acoustiques. En ce qui a trait à la localisation auditive, il faudrait procéder à quelques

vérifications en laboratoire et sur le terrain pour s'assurer que ce type de signal rencontre des normes acceptables. Le logiciel Détectson^{MD} ne permet pas de telles vérifications.

Lors de la discussion qui a suivi la validation auprès des utilisateurs, plusieurs commentaires ont été émis. Selon les 8 participants provenant de divers milieux (CSST, ACEQ, FTQ, Désourdy, ASP Construction), il ne faut pas que l'alarme comporte trop de basses fréquences et elle doit véhiculer un caractère d'urgence sans provoquer de réaction de sursaut ou d'inconfort. Par ailleurs un consensus semblait établi à savoir qu'il faut éviter d'avoir plusieurs alarmes différentes sur les multiples véhicules lourds qui circulent sur les chantiers de construction. D'une part, cette alternative ne ferait que détériorer un environnement sonore perçu déjà comme une cacophonie. D'autre part, cela pourrait aussi accentuer le phénomène d'habituation auditive qui amène les travailleurs à ignorer les alarmes.

Enfin, tous ont convenu que, même si la nouvelle alarme proposée améliore la propagation sonore derrière les véhicules lourds, la sécurité des travailleurs ne sera pas entièrement assurée. Il apparaît important de revoir l'organisation du travail propre au recul des véhicules lourds sur les chantiers. Entre autres, il faudrait éviter les déplacements des travailleurs dans les mêmes aires de travail que les véhicules lourds. Des études ergonomiques permettraient de mieux cerner les solutions qui, jumelées à une alarme de recul dont les caractéristiques acoustiques et d'emplacement sont optimales, amélioreraient encore davantage la sécurité derrière les véhicules.

15.0 APPLICABILITÉ DES RÉSULTATS ET RETOMBÉES ÉVENTUELLES

Le présent projet a permis d'identifier les caractéristiques acoustiques et d'emplacements optimales des alarmes de recul en terme acoustique (amélioration du patron de propagation sonore) et psycho-acoustique (audibilité et localisation auditive chez les sujets à audition normale ou atteints de surdité professionnelle). Quelques éléments de localisation auditive mériteraient d'être vérifiés avant d'adopter le signal sonore proposé. Sur la base des connaissances en localisation auditive, le signal retenu devrait rencontrer des normes acceptables. Sans aucun doute, ce signal devrait être aussi facile sinon plus facile à localiser que les alarmes actuelles comportant une seule fréquence autour de 1000 Hz. Par ailleurs, il serait intéressant de valider le signal retenu dans différents bruits ambiants typiques des chantiers de construction pour s'assurer de son audibilité et de sa reconnaissance.

Par la suite, les recommandations pourront être reprises par le Comité de révision du Code de sécurité pour les travaux de construction. Entre autres, la référence à la norme SAE-J994 devra être modifiée afin de s'assurer que les alarmes de recul comportent 3 fréquences distinctes simultanées situées à 1000, 1150 et 1300 Hz, qu'elles aient un niveau sonore suffisant sans être trop intense (max. 100 dBA) et qu'elles soient de type pulsé. Enfin, il faudrait ajouter des spécifications quant à l'emplacement de l'alarme de recul sur les véhicules, la visibilité de l'alarme étant un facteur déterminant.

REFERENCES

- ANON (1973). Fundamentals and Abatement of Highway Traffic Noise, FHWA-HHI-HEV-73-7976-1.
- Beranek, L.L. (1988). Acoustical Measurements. Revised edition. Published for the Acoustical Society of America by the American Institute of Physics.
- Best, J.B., (1986), Cognitive Psychology, West Publishing, St.Paul, p83.
- Boillot, J.P., Fontaine, J.C., Baribeau, R. (1989). Réduction des angles morts des véhicules motorisés, étude préliminaire. Rapport présenté à l'IRSST, 11 avril 1989.
- Bregman, A.S. (1989). Auditory analysis: The perceptual organisation of sound. Oxford Press, Cambridge, p.47
- Broadbent, D. (1958). Perception and communication. Pergamon, London.
- CEI 804 (1985). Sonomètres intégrateurs-moyenneurs. Bureau Central de la Commission Electrotechnique International, Genève.
- Code de sécurité pour les travaux de construction (1994). S2.1, r.6, Gouvernement du Québec.
- Construction safety association of Ontario (1991). Backing Up. Construction safety, mars/avril 1991.
- CSST, Gouvernement du Québec (1988). Le recul de camion et les risques d'écrasement. Alerte Action 33, janvier-février 1988, dans Prévention au travail.
- Deatherage, B.H. (1972). Auditory and other sensory forms of information presentation. U.S. Dept. of Defense, Joint service Syeering committee, Human Engineering guide to equipment design, American Institute for Research, Washington, D.C.
- Delany et Bazley, (1970). Acoustical properties of fibrous absorbant materials. Applied Acoustics 3, 105-116.
- Deutsh, J. & Deutsh, D. (1963). Attention: some theoretical consideration, Psychological Review, 70, 80-90.
- Duchon, J.C. & Laage, L.W. (1986). The consideration of human factors in the design of a backing-up warning system. Proceedings of the Human Factors Society 30th Annual Meeting, vol1., 261-264.
- Franszczuk, I. (1973). The effect of annoying noise on some psychological functions during work. Proceedings of the international congress on noise as a public health problem. Ward, ed. 550/9-73-008, U.S. Environ. Prot. Agency, 425-428.
- Gorea, A., Demany, L. et Bonnet, C. (1986). Détection et identification en vision et en audition. Bulletin de psychologie, 39, 375, 349-353.
- Hétu, R. (1995). Communication personnelle. Propos basés sur plus d'une cinquantaine de relevés d'avertisseurs sonores faits à l'intérieur de projets de démonstration menés dans divers types d'entreprises. Résultats non publiés à ce jour.
- Hétu, R., Laroche, C., Tran Quoc, H. et Larocque, R. (1991). Facilitation de l'accès à un logiciel portant sur la détection des avertisseurs sonores en milieu de travail bruyant. Rapport final de subvention IRSST PE-90-11, Montréal.

Honda, S. & Ohtsuki, M. (1984). Back-up detection system. National technical report, vol. 30(2), 105-114.

INRS (1990). Reculer: Faut voir. Travail et sécurité, mars 1990.

INRS (1992). Prévention des risques occasionnés par les engins circulant ou manoeuvrant fréquemment en marche arrière. Travail et sécurité, fév.92.

ISO 3744 (1981). Acoustique-Détermination des niveaux de puissance acoustique émis par les sources de bruit - méthodes d'expertise pour les conditions de champs libre au dessus d'un plan réfléchissant.

ISO 7731 (1986). Danger signals for workplaces- Auditory danger signals.

Kahneman, D. (1973). Attention and effort. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New-Jersey.

Laroche, C. (1994). Review of the literature on sound source localization and applications to noisy workplace. Acoustique Canadienne, 22(4), 13-18.

Laroche, C., Héту, R., L'Espérance, A. (1991). Des alarmes de recul qui tuent. Travail et santé, vol.7(1), 9-13.

Laroche, C., Héту, R. et Nicolas, J. (1990). Conception et validation d'un modèle informatisé de détection de signaux sonores de danger en milieux de travail bruyants. Rapport d'étape, Programme de recherche subventionnée, IRSST, RS-89-05, mars 1990.

Laroche, C., Lefebvre, L., Ross, M.J. & Larocque, R. (1993). Détermination des caractéristiques acoustiques optimales des alarmes de recul. Phase II: Mesures terrain et mise au point d'un modèle de propagation sonore. Rapport final, Programme de recherche subventionnée, IRSST, CR-92-05, mars 1993.

Laroche, C., Tran Quoc, H., Héту, R. et McDuff, S. (1991). "Detectsound": A computerized model for predicting the detectability of warning signals in noisy workplaces. Applied Acoustics, 32, 193-214.

Legris, M., Hamelin Y., Jalbert, R. & Rousseau, G. (1990). Profils d'exposition au bruit des opérateurs d'équipement lourd, de pelle mécanique et des manoeuvres associés, Sous-comité B.T.P. du Comité provincial des C.H.-D.S.C. en Sant. au travail. Présenté au congrès de l'AHIQ, 1990.

L'Espérance, A., Nicolas, J. et Daigle, G. A. (1989). Insertion loss of absorbent barriers on ground, J. Acoust. Soc. Am., 86, 1060-1064.

Lisper, H.O., Kjellberg, A. et Melin, L. (1972). Effects of signal intensity on increase of reaction time on auditory monitoring task. Perceptual and motor skills, 34, 439-444.

Miller, G.A. (1956). The magical number seven, plus or minus two: some limits on our capacity for processing information. Psychological review, 63, 81-97.

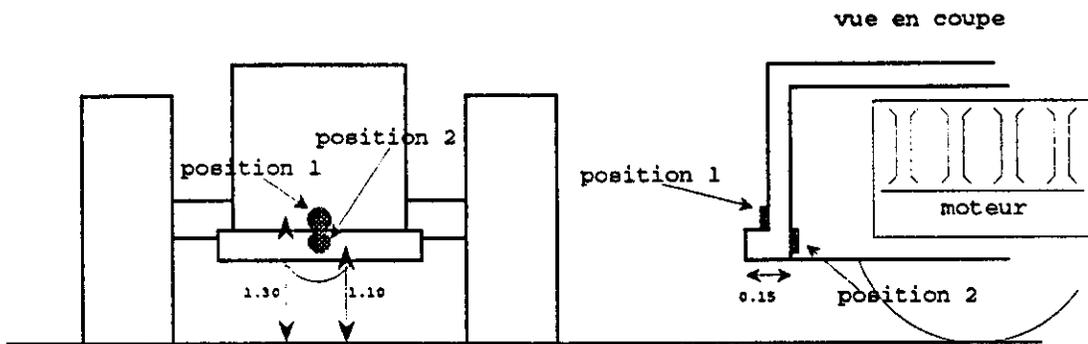
Nicolas, J., Embleton, T.F.W. et Pierce, J.E. (1983). Precise model measurements versus theoretical prediction of barrier insertion loss in presence of the ground, J. Acoust. Soc. Am., 73, 44-54.

Patterson, R.D. (1982). Guidelines for auditory warning systems on civil aircraft. CAA Paper 82017, Civil Aviation Authority, London.

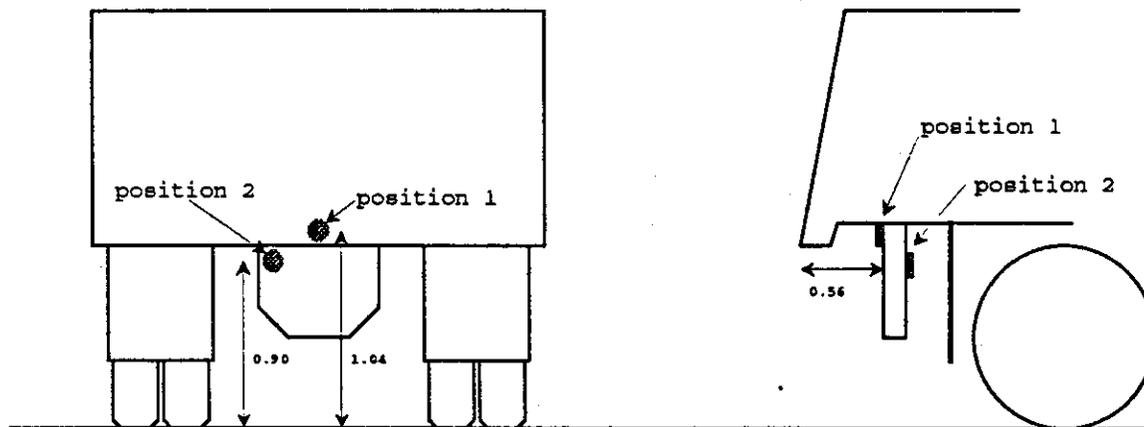
Patterson, R.D., Milroy, R. (1980). Auditory warnings on civil aircraft: the learning and retention of warnings. Final contract report 7D/S/0142. MRC Applied Psychology Unit, Cambridge.

- Posner, M.I., Boies, S.J. (1971). Components of attention. *Psychological review*, 77, 353-363.
- Ross, M.-J., Laroche, C. et Larocque, R. (1992). Détermination des caractéristiques acoustiques optimales des alarmes de recul. Phase I. Inventaire des véhicules lourds, des réglementations et des normes relatives aux alarmes de recul. Commandite spéciale, IR SST.
- Royster, L.H. & Stephenson, J.E. (1976). Characteristics of several industrial noise environments, *J. of Sound and Vibration*, 47(3), 313-322.
- SAE J994b MAR85 (1985). Alarm-Backup-Electric-Performance, Test and Application.
- Saez, P. (1983). A radar for reverse (automobiles). *Revista Espanola de Electronica*, vol. 30 (348), 32-37.
- Scheiderman, R. (1990). Auto radar by 1996. *Microwaves & RF*, January 1990, 72.
- Shiffrin, R.M., Wesley Grantham, D. (1974). Can attention be allocated to sensory modalities. *Perception and Psychophysics*, 15, 3, 460-474.
- Simpson, A. (1989). La surdité professionnelle chez les travailleurs du secteur Bâtiment et Travaux Publics, examinés par les DSC et les CLSC à l'aide des laboratoires mobiles du Service Parlab. Sous-comité BTP du Comité Provincial des CH-DSC en Santé au Travail, Décembre 1989.
- Thompson, R.F., Spencer, W.A. (1966). Habituation: a model phenomenon for the study of neural substrates of behaviour. *Psychological review*, 73, 16-43.
- Treisman, A. (1969). Strategies and models of selective attention. *Psychological review*, 76, 282-299.
- Warner, H.D. (1969). Effects of intermittent noise on human target detection. *Human factors*, 11, 3, 245-250.
- Wilkins, P. (1981). Assessing the effectiveness of auditory warnings. *British Journal of Audiology*, 15, 263-274.
- Wilkins, P., Martin, A.M. (1981). The effect of hearing protection on the perception of warning sounds. *Proceeding of the Int. Symposium on Personal Hearing Protection in Industry*. Raven Press, New-York.
- Wilkins, P.A., Acton, W.I. (1982). Noise and accidents. A review. *Annals of occupational hygien*, 25, 3, 249-260.

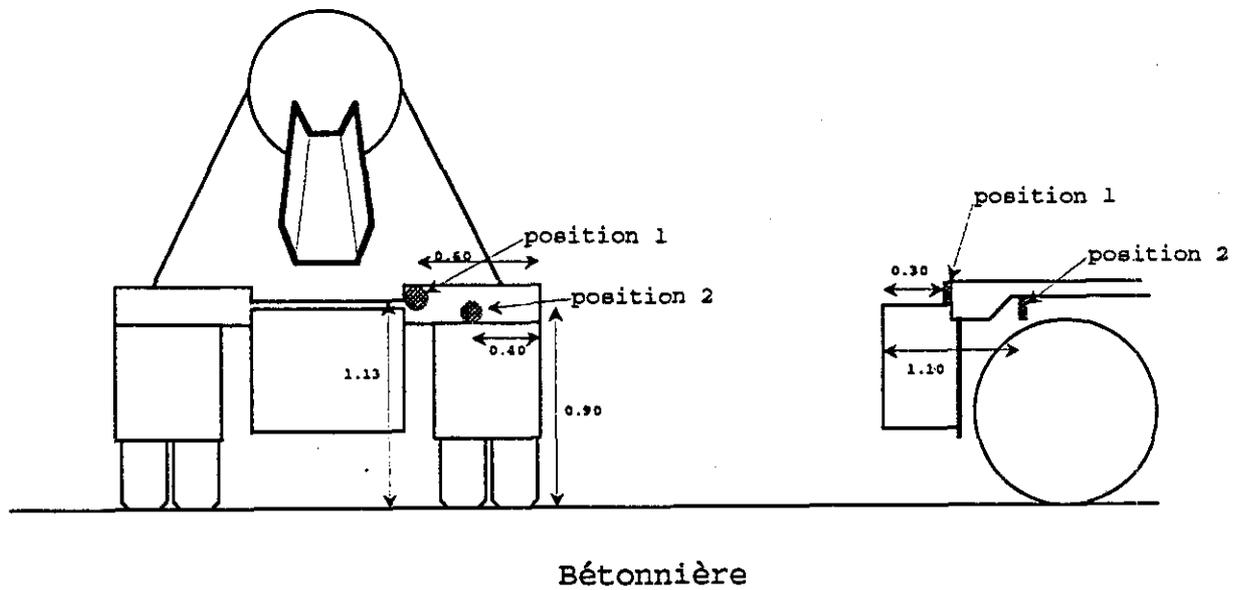
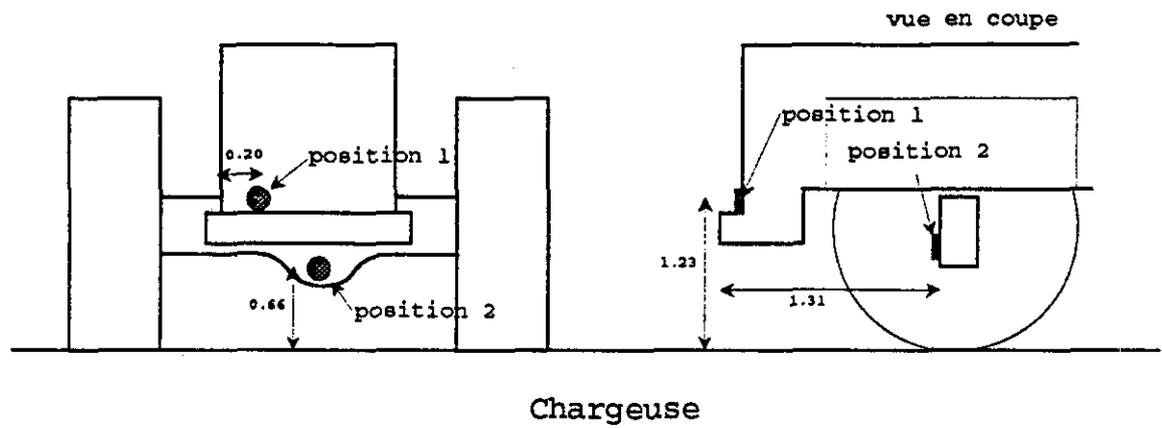
ANNEXE I
Croquis de l'emplacement des alarmes de recul sur chacun des véhicules



Niveleuse



Camion à benne



ANNEXE II.
Tableaux synthèse des mesures en laboratoire

Tableau II.1: Mesures du niveau de pression acoustique aux 10 points de mesure (ISO 3744) pour chacune des 10 alarmes étudiées. Le niveau moyen (L_p) ainsi que la puissance acoustiques (L_w) sont aussi présentés. Le calcul de la puissance acoustique est basé sur les niveaux maximums enregistrés à chacun des 10 points de mesure: $L_w = L_p + 10 \log S$, $S=2\pi R^2$.

Niveaux de pression acoustique des alarmes de recul à 1 mètre (dBA)						
	BIG MOUTH	TRI-LITE TFA2		FEDERAL 256	Micro Alarm	ECCOSA 914
		niveau 1	niveau 2			
Point:1	92.6	92.3	98.5	100.2	91.3	84.0
2	93.6	92.4	98.5	100.2	95.4	86.5
3	92.5	93.0	99.1	99.2	92.2	86.5
4	90.0	88.4	94.4	97.6	85.4	82.0
5	89.7	89.7	95.6	97.3	80.9	83.0
6	89.5	90.4	96.3	96.1	90.2	80.5
7	90.1	89.4	95.7	92.8	94.0	81.5
8	90.4	91.5	97.8	93.7	90.3	80.5
9	90.2	92.6	98.8	94.2	90.0	80.5
10	94.1	94.8	101	101.4	94	88.5
L_p	91.6	91.8	98	98	92	84
L_w	99.6	99.8	106	106	100	92

Niveaux de pression acoustique des alarmes de recul à 1 mètre (dBA)						
	DAP 112	DAP 199	PRECCO 1040	NORDIK 80-A	WARRICK#8	WARRICK#12
	Point:1	108.0	97.0	86.7	101	80
2	109.5	99.8	88.1	104.6	80	83
3	109.3	99.1	87.1	102.6	80	83
4	103.0	93.0	80.5	97.1	84	86
5	104.5	93.0	81.0	100.0	83	87
6	104.5	93.0	81.1	95.4	82	84
7	107.0	95.4	82.1	99.8	85	85
8	106.0	96.5	84.0	101.0	86	87
9	105.5	94.0	81.5	101.8	84	86
10	114.0	103.6	91.0	107.7	91	94.7
L_p	108	98	86	102	83.5	86
L_w	116	106	94	110	91.5	94

Tableau II.2: Tableau récapitulatif de la puissance acoustique (L_w), des niveaux de pression acoustiques à 1 mètre (L_p , pt10) et du contenu fréquentiel de chacune des dix alarmes.

Alarme	L_w (dBA)	L_p , pt10 (dBA)			Fréquence (Hz)
		Mes.1	Mes.2	Mes.3	
ECCOSA 914	92	88.5			1312
DAP 112	116	113.5	114	112	1280
DAP 199	106	103.6			1272-1310 modulé
PRECCO 1040	94	91.0			1200
NORDIPRO NORDIK-80-A	110	107.7	106	108	1140-1280 modulé
BIG-MOUTH	100	94	97		700-3000
TRI-LITE TFA2 NIVEAU 1 NIVEAU 2	100 106	94.8 101			1230
FEDERAL 256	106	91.4			1270
Micro Alarm2	99	94.2	94	93	2816
WARRICK#8	91.5	91	90		2750/2812 modulé
WARRICK#12	94	94	94		2450/3025 modulé

ANNEXE III.
Tableaux récapitulatifs pour chacun
des véhicules lourds étudiés sur le terrain.

Tableau III.1 Tableau récapitulatif des niveaux de pression acoustique maxima et minima enregistrés à un axe ou une distance donnée, pour chacune des alarmes montée sur la niveleuse en position 1 et 2. Les différences de niveaux entre la position 1 et 2 (Δ , P1-P2) et entre Lmax et Lmin ($L_{max}-L_{min}$) ainsi qu'une estimation de l'ampleur des interférences sont aussi présentés.

Alarme	Paramètres		Niveaux de pression acoustique				
			position 1		position 2		Δ P1-P2
			(dBA)	(axes) distance	(dBA)	(axes) distance	
Micro Alarm	1 m	Lmax	98	(4-5)	92	(4-5)	6
		Lmin	80	(6)	72	(7)	8
		Lmax-Lmin	18		20		
		Interférence	+ -		+ +		
	1-4 m axe 5	Lmax	103	0m	98	0m	5
		Lmin	83	3.4m	71	1.7m	8
		Lmax-Lmin	20		17		
		Interférence	+		+ +		
Warrick #8	1 m	Lmax	92	(4-5)	88	(4-5)	4
		Lmin	78	(6-7)	72	(3)	6
		Lmax-Lmin	14		16		
		Interférence	+ -		+ +		
	0-4 m axe 5	Lmax	95dB	0.3m	91	0.5m	4
		Lmin	82	0m	73	2.6m	9
		Lmax-Lmin	13		18		
		Interférence	+ -		+		
Warrick #12	1 m	Lmax	97	(4-5)	90	(3-4)	7
		Lmin	79	(6-7)	72	(3)	7
		Lmax-Lmin	18		18		
		Interférence	+ +		+ +		
	0-4 m axe 5	Lmax	110	0.7m	97	0.3m	13
		Lmin	90	2.8m	75	1.8m	15
		Lmax-Lmin	20		22		
		Interférence	+ +		+ +		

Tableau III.1 Suite

Alarme	Paramètres		Niveaux de pression acoustique				Δ P1-P2
			position 1		position 2		
			(dBA)	(axes) distance	(dBA)	(axes) distance	
Dap 112	1 m	L _{max}	110	(4-5)	106	(5)	4
		L _{min}	95	(3)	85	(3)	10
		L _{max} -L _{min}	15		21		
		Interférence	+ -		+ +		
	1-4 m axe 5	L _{max}	113	0m	111	0m	2
		L _{min}	93	3.8m	92	3.3m	1
		L _{max} -L _{min}	20		19		
		Interférence	+ -		+ +		
Nordick80	1 m	L _{max}	93	(4-5)	88	(5-6)	5
		L _{min}	83	(3)	79	(6)	4
		L _{max} -L _{min}	10		9		
		Interférence	-		+		
	0-4 m axe 5	L _{max}	98	0m	92	0m	6
		L _{min}	82	4.0m	80	2.8m	2
		L _{max} -L _{min}	16		12		
		Interférence	+ -		+		

Tableau III.2 Tableau récapitulatif des niveaux de pression acoustique maxima et minima enregistrés à un axe ou une distance donnée, pour chacune des alarmes montée sur la chargeuse en position 1 et 2. Les différences de niveaux entre la position 1 et 2 (Δ , P₁-P₂) et entre L_{max} et L_{min} (L_{max}-L_{min}) ainsi qu'une estimation de l'ampleur des interférences sont aussi présentés.

Alarme	Paramètres		Niveaux de pression acoustique				
			position1		position2		Δ P1-P2
			(dBA)	(axes) distance	(dBA)	(axes) distance	
Micro Alarm	1 m	L _{max}	98	(5)	92	(4)	6
		L _{min}	83	(3-4)	82	(6)	1
		L _{max} -L _{min}	15		10		
		Interférence	+		++		
	0-4 m axe 5	L _{max}	100	0m	90	1.0m	10
		L _{min}	78	2.9m	68	2.8m	10
		L _{max} -L _{min}	22		22		
		Interférence	+		++		
Nordick #80	1 m	L _{max}	108	(5-6)	100	(5-6)	8
		L _{min}	92	(3-4)	87	(4-5)	5
		L _{max} -L _{min}	16		13		
		Interférence	+ -		+		
	1-4 m axe 5	L _{max}	93	1.0m	93	1.0m	0
		L _{min}	83	3.2m	82	3m	1
		L _{max} -L _{min}	10		11		
		Interférence	-		+ -		
Warrick #12	1 m	L _{max}	95	(5)	88	(3-4)	7
		L _{min}	78	(3-4)	71	(5)	7
		L _{max} -L _{min}	17		17		
		Interférence	+		++		
	1-4 m axe 5	L _{max}	92	1.3m	83	1.0m	9
		L _{min}	78	2.7m	68	1.2m	10
		L _{max} -L _{min}	14		15		
		Interférence	++		++		
Dap 112	1 m	L _{max}	111	(5)	102	(5)	9
		L _{min}	100	(5)	89	(5-6)	11
		L _{max} -L _{min}	11		13		
		Interférence	+		++		

Tableau III.3 Tableau récapitulatif des niveaux de pression acoustique maxima et minima enregistrés à un axe ou une distance donnée, pour chacune des alarmes montée sur le camion à benne en position 1 et 2. Les différences de niveaux entre la position 1 et 2 (Δ , P1-P2) et entre L_{max} et L_{min} ($L_{max}-L_{min}$) ainsi qu'une estimation de l'ampleur des interférences sont aussi présentés.

Alarmé	Paramètres	Niveaux de pression acoustique					
		position 1		position 2		Δ P1-P2	
		(dBA)	(axes) distance	(dBA)	(axes) distance		
Micro Alarm	1m	L_{max}	91	(4)	88	(5-6)	3
		L_{min}	68	(3)	68	(4-5)	0
		$L_{max}-L_{min}$	23		20		
		Interférence	+	+	+	+	
	1-4 m axe 5	L_{max}	89	1.4m	86	1.3m	3
		L_{min}	73	2.2m	70	2.3m	3
		$L_{max}-L_{min}$	16		16		
		Interférence	+	+	+	+	
Warrick #8	1m	L_{max}	84	(5)	80	(6)	4
		L_{min}	75	(6)	70	(4-5)	5
		$L_{max}-L_{min}$	9		10		
		Interférence	+	-	+	+	
	1-4 m axe 5	L_{max}	83	1.2m	79	1.2m	4
		L_{min}	70	3.7m	68	2.7m	2
		$L_{max}-L_{min}$	13		11		
		Interférence	+	-	+	-	
Warrick #12	1m	L_{max}	88	(4-5)	88	(5-6)	0
		L_{min}	72	(3)	65	(3)	7
		$L_{max}-L_{min}$	16		23		
		Interférence	+		+	+	
Dap 112	1m	L_{max}	103	(4-5)	98	(3)	5
		L_{min}	98	(5-6)	81	(6)	17
		$L_{max}-L_{min}$	5		17		
		Interférence	-		+		
	1-4 m axe 5	L_{max}	103	1m	95	0m	8
		L_{min}	91	3m	83	1.8m	8
		$L_{max}-L_{min}$	12		12		
		Interférence	-		+	-	

Tableau III.4 Tableau récapitulatif des niveaux de pression acoustique maxima et minima enregistrés à un axe ou une distance donnée, pour chacune des alarmes montée sur la bétonnière en position 1 et 2. Les différences de niveaux entre la position 1 et 2 (Δ, P_1-P_2) et entre L_{max} et L_{min} ($L_{max}-L_{min}$) ainsi qu'une estimation de l'ampleur des interférences sont aussi présentés.

Alarme	Paramètres	Niveaux de pression acoustique					
		position 1		position 2		Δ P ₁ -P ₂	
		(dBA)	(axes) distance	(dBA)	(axes) distance		
Micro Alarm	1 m	L_{max}	98	(5)	90	(3-4)	8
		L_{min}	83	(4)	72	(4)	11
		$L_{max}-L_{min}$	15		18		
		Interférence	++		++		
	1-4 m axe 5	L_{max}	95	1.7m	83	1.4m	12
		L_{min}	87	0.3m	71	1.6m	15
		$L_{max}-L_{min}$	8		12		
		Interférence	+		++		
Warrick #8	1 m	L_{max}	98	(4)	87	(4)	11
		L_{min}	78	(5)	70	(5)	8
		$L_{max}-L_{min}$	20		17		
		Interférence	+		++		
	1-4 m axe 5	L_{max}	91	1.8m	80	2.2m	11
		L_{min}	80	1.0m	71	1.6m	9
		$L_{max}-L_{min}$	11		9		
		Interférence	-		+-		
Warrick #12	1 m	L_{max}	99	(4)	90	(3-4)	9
		L_{min}	81	(5)	68	(6-7)	13
		$L_{max}-L_{min}$	18		22		
		Interférence	++		++		
	1-4 m axe 5	L_{max}	92	1.0m	N/D		
		L_{min}	83	3.8m	N/D		
		$L_{max}-L_{min}$	9				
		Interférence	+-				
Dap 112	1 m	L_{max}	116	(3-4)	108	(2-3)	8
		L_{min}	100	(5)	88	(3-4)	12
		$L_{max}-L_{min}$	16		20		
		Interférence	++		++		
	1-4 m axe 5	L_{max}	110	1.1m	102	1.0m	8
		L_{min}	97	4.0m	85	1.8m	12
		$L_{max}-L_{min}$	13		17		
		Interférence	+-		+		