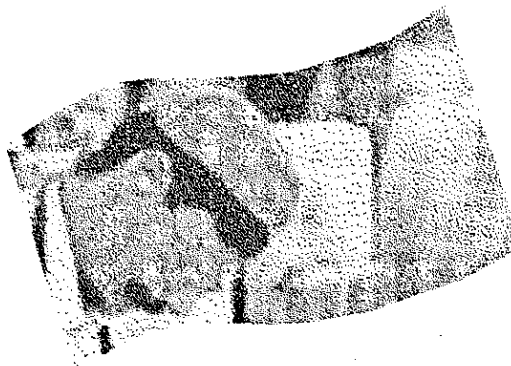


Réduction du bruit occasionné par les opérations d'ébarbage de pièces d'aluminium coulées



ÉTUDES ET RECHERCHES

Frédéric Laville
Marc Thomas
Yves Beauchamp

Décembre 1997 R-177

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,

Réduction du bruit occasionné par les opérations d'ébarbage de pièces d'aluminium coulées

Frédéric Laville, Marc Thomas et Yves Beauchamp
École de technologie supérieure

ÉTUDES ET
RECHERCHES

RAPPORT

Ont participé à ce projet :

Eastern Die Casting Inc. (« EDC »)

- J.C. Tawil
- Denis Marcoux

Commission de la santé et de la sécurité du travail (« CSST »)

- Sorin Eliskof

Institut de recherche en santé et sécurité du travail du Québec (« IRSST »)

- Pierre Luc Arsenault

École de technologie supérieure (« ÉTS »)

- Frédéric Laville
- Marc Thomas
- Yves Beauchamp
- Marc Deshaies
- Marc Renzo
- Yahia Ould Abdesslam

SOMMAIRE

Donnant suite à une demande faite en juin 1996 par l'IRSST et par la Direction régionale de la CSST, Île de Montréal – 2, l'ÉTS, par l'entremise de l'ÉREST, a entrepris un projet visant à réduire le bruit occasionné par les opérations d'ébarbage d'éléments de pièces d'aluminium coulées. En effet, le procédé d'ébarbage, effectué à l'aide d'un outil pneumatique à main, génère un bruit pouvant osciller entre 100 et 110 dB(A).

Plus spécifiquement, l'objectif de ce projet était de tester diverses méthodes connues, applicables à la réduction du bruit occasionné par l'ébarbage d'éléments de barbecues (cuves et couvercles) coulés par la compagnie EDC. Il s'agissait de déterminer quelle méthode était susceptible de réduire le plus efficacement le bruit, puis d'implanter cette méthode dans le lieu de travail en tenant compte des coûts d'implantation, des exigences de productivité et des aspects ergonomiques du travail.

Notre diagnostic a mis en évidence le rayonnement acoustique des éléments de barbecue (cuves et couvercles) comme la principale source de bruit. Nous avons ensuite évalué expérimentalement le potentiel de chacun des principes de solution suivants, appliqués à l'élément : ajout de masse, augmentation de la rigidité, ajout d'amortissement et ajout d'une barrière acoustique. Le développement de la solution a consisté à rechercher des matériaux et un montage de ceux-ci permettant de construire un prototype respectant les principes de solution dont le potentiel avait été démontré. En outre, le prototype devait respecter les contraintes suivantes : être léger, maniable, simple et peu coûteux à réaliser. La prise en compte des aspects ergonomiques a conduit à proposer un support articulé et mobile en rotation. Celui-ci résout les problèmes ergonomiques liés au fait que, dans le procédé original, la pièce était manipulée par une seule main pendant que l'autre main actionnait l'outil d'ébarbage.

L'application des principes de solution a permis de réduire le bruit rayonné par l'élément de barbecue jusqu'à 38 dB(A) (dans le cas limite de la pièce presque totalement immergée dans le sable). Lors du développement du prototype, une réduction de 20 dB(A) a été obtenue avec un montage où l'emploi de matériaux légers a été optimisé. Le résultat pour le bruit total occasionné par le procédé d'ébarbage est une réduction de 10 dB(A).

En plus de résoudre le problème spécifique du bruit occasionné par l'ébarbage de pièces d'aluminium coulées chez EDC, ce projet a des retombées pour la recherche conduite par l'ÉREST sur la réduction du rayonnement acoustique des structures des produits manufacturés lorsqu'un procédé de fabrication engendre une excitation vibratoire de la structure : il a mis en évidence la grande variété des solutions technologiques possibles pour réduire le rayonnement acoustique et, en particulier, la diversité des matériaux et des combinaisons de matériaux pouvant servir à réaliser un support adapté à la structure rayonnante.

TABLE DES MATIÈRES

	Page
1. INTRODUCTION	1
2. LE BRUIT D'ÉBARBAGE	3
2.1 Niveau sonore en usine	3
2.2 Diagnostic des sources de bruit	4
2.3 Évaluation quantitative en laboratoire	5
2.3.1 Essais avec du sable	6
2.3.2 Essais avec de l'eau	7
2.3.3 Essais sur l'amortissement apporté à l'eau par une enveloppe de plastique et l'ajout d'un produit coagulant	8
2.3.4 Essais sur l'augmentation de la rigidité de la structure	9
2.3.5 Essais avec de la laine de verre	11
3. ANALYSE ERGONOMIQUE	12
4. DÉVELOPPEMENT DE LA SOLUTION	12
4.1 Aspects acoustiques	12
4.1.1 Mise au point d'un prototype	12
4.1.2 Évaluation des performances acoustiques du prototype	14
4.2 Autres aspects ergonomiques	17
4.3 Spécifications du prototype	20
5. ASPECTS COMPLÉMENTAIRES	27
5.1 Étude de l'outil	27
5.2 Traitement acoustique de l'atelier	30
6. CONCLUSION	33

1. INTRODUCTION

Le présent rapport présente un projet de réduction du bruit occasionné par les opérations d'ébarbage d'éléments de barbecues (cuves et couvercles) coulés par la compagnie EDC. Ce projet résulte d'une demande faite par l'IRSST et par la Direction régionale de la CSST, Île de Montréal – 2, en juin 1996.

La compagnie EDC fabrique des éléments de barbecues (familles de cuves et couvercles) par moulage d'aluminium. Ces éléments doivent être ébarbés¹. Pour ce faire, on utilise un outil à main pneumatique entraînant une courroie abrasive à 1600 tr/mn. Lors de l'ébarbage tel qu'il est pratiqué actuellement, l'opérateur maintient d'une seule main l'élément de barbecue, qui repose sur une table, pendant que l'autre main promène l'outil sur les bavures pour les éliminer. La figure 1 illustre le travail d'un opérateur en train d'ébarber un couvercle de barbecue. Il est à noter que ce procédé génère un bruit pouvant varier entre 100 et 110 dB(A). Quinze (15) opérateurs, répartis sur deux quarts de travail (« *shifts* ») et huit postes fixes, sont touchés par ce bruit. En outre, les vibrations segmentaires (c'est-à-dire transmises à l'ensemble main-bras des opérateurs) sont non négligeables.

L'objectif de ce projet était de tester diverses méthodes connues pour réduire le bruit occasionné par l'ébarbage des cuves et des couvercles de barbecues. Il s'agissait de déterminer laquelle de ces méthodes offre le meilleur potentiel de réduction du bruit et d'implanter cette méthode sur le lieu de travail en prenant en compte les coûts d'implantation, la productivité et les aspects ergonomiques du travail.

¹ On dit aussi « ébavurer »



Figure 1: L'opération d'ébarbage chez EDC; différentes positions de l'opérateur durant l'ébarbage

L'analyse du bruit d'ébarbage et des principes de solution est présentée à la section 2, l'analyse ergonomique à la section 3 et le développement de la solution, des points de vue acoustique et ergonomique, à la section 4. La section 5 présente des aspects d'analyse complémentaires portant sur l'outil et le traitement acoustique de l'atelier.

2. LE BRUIT D'ÉBARBAGE

2.1 Niveau sonore en usine

Le bruit occasionné par l'ébarbage qui est perçu à l'oreille de l'opérateur est élevé. Au cours d'une opération, ce bruit peut osciller entre 100 et 110 dB(A) environ. La figure 2 présente un spectre sonore en bandes d'octave correspondant à une opération typique. On observe des niveaux élevés et assez voisins dans les bandes d'octave de 500 à 16000 Hertz.

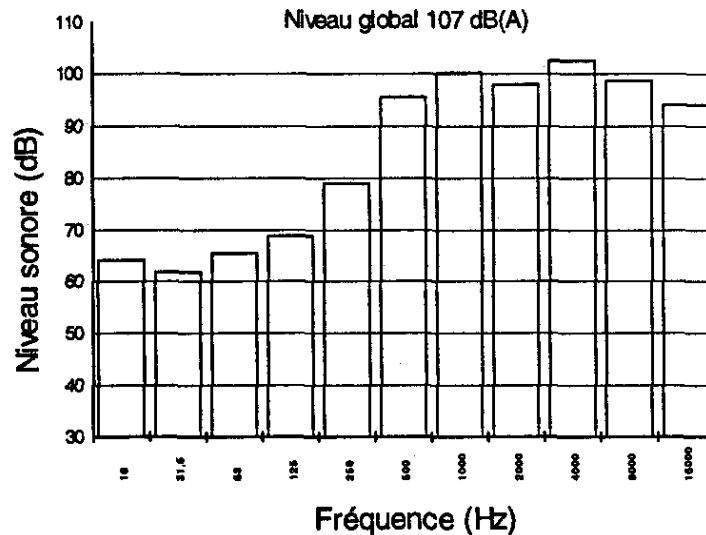


Figure 2 : Spectre typique du bruit perçu par l'opérateur pendant l'ébarbage

2.2 Diagnostic des sources de bruit

Afin de distinguer les sources de bruit et de déterminer leur contribution respective, une première expérimentation a été entreprise en excitant l'élément de barbecue avec l'outil stationnaire reposant directement, sans pression manuelle, sur une paroi du barbecue. Cette approche ne permet pas d'atteindre les niveaux élevés observés durant l'opération d'ébarbage réelle, mais elle a l'avantage de fournir une source d'excitation facile à reproduire pour chacune des conditions expérimentales.

TABEAU 1 : ÉVALUATION DES SOURCES DE BRUIT

Source de bruit	Niveau mesuré [dB(A)]	Niveau calculé [dB(A)]
Outil fonctionnant à vide (moteur + sortie d'air)	81,1	
Outil fonctionnant à vide avec silencieux (moteur)	80,6	Sortie d'air : $81,1 - 80,6 = 71,5$
Outil sur pièce au rayonnement acoustique négligeable	82,0	Impact de la courroie abrasive sur la pièce : $82,0 - 80,6 = 74,7$
Outil appuyé sur couvercle de barbecue	87,7	Rayonnement acoustique : $87,7 - 82,0 = 86,3$

L'outil a été testé dans chacune des conditions expérimentales suivantes :

- a) fonctionnement à vide;
- b) fonctionnement à vide avec un silencieux (pour distinguer le bruit du moteur pneumatique de celui de l'échappement);
- c) fonctionnement sur une pièce peu rayonnante (un couvercle de barbecue enfoui

dans le sable) (pour déterminer la contribution de l'impact de la courroie abrasive sur la pièce); et, enfin, d) fonctionnement alors que l'outil est appuyé directement, par son propre poids, sur l'élément de barbecue (pour déterminer la contribution du rayonnement acoustique de l'élément de barbecue). Les résultats de ces tests sont fournis au tableau 1. Comme on peut le constater à leur lecture, la source de bruit dominante provient du rayonnement acoustique du barbecue : les efforts ont donc été concentrés sur la réduction de cette source.

2.3 Évaluation quantitative en laboratoire

Nous avons voulu évaluer les effets de divers principes de solution (ajout de masse, augmentation de la rigidité, ajout d'amortissement et ajout d'une barrière acoustique) sur la diminution du rayonnement de l'élément de barbecue. À cette fin, un montage de laboratoire a été réalisé dans lequel la pièce est excitée par l'impact d'une bille lâchée d'une hauteur fixe. Les bruits produits sont mesurés et enregistrés à l'aide du sonomètre analyseur LARSON DAVIS 2800. Le schéma de la figure 3 illustre le montage employé.

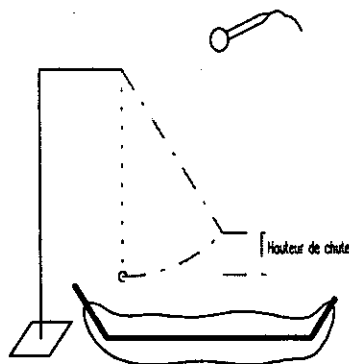


Figure 3 : Montage pour l'évaluation de la diminution du rayonnement acoustique

Grâce à ce montage, divers matériaux réunissant un ou plusieurs effets ont ensuite fait l'objet d'expérimentations. Les résultats de ces essais sont présentés ci-après.

2.3.1 Essais avec du sable

Le sable, qui combine les effets de masse et d'amortissement, a été essayé en premier. L'effet de différents niveaux de remplissage (sable à l'intérieur) et d'immersion (sable à l'extérieur) a été examiné. En bref, le remplissage s'avère plus efficace que l'immersion, et le meilleur résultat est obtenu lorsque le barbecue est entièrement rempli et immergé jusqu'aux bords dans le sable. Le tableau 2 présente le détail des résultats.

TABLEAU 2 : ESSAIS AVEC DU SABLE

Descriptions	Réduction de bruit [dB(A)]
Référence : Aucun sable, ni à l'extérieur ni à l'intérieur	0
Immersion et remplissage complets	38,2
Immersion et remplissage à 4 po du bord supérieur	24,3
Immersion et remplissage à 5 po du bord supérieur	22,6
Immersion et intérieur vide	21,9
Sans sable extérieur et remplissage à 5 po du bord sup.	19,3
Sans sable extérieur et remplissage à 4 po du bord sup.	22,1
Sans sable extérieur et remplissage complet	32,1

Les essais avec le sable sont très intéressants, car ils fournissent une référence des effets qui peuvent être obtenus par ajout de masse et d'amortissement. Cependant, ce matériau n'est pas facilement applicable à une solution. Le temps de manipulation doit demeurer court, et le poids du sable et le fait qu'il ne garde pas sa forme le rendent peu pratique à cet égard.

2.3.2 Essais avec de l'eau

Nous avons ensuite fait des essais avec de l'eau, un autre matériau doté de l'effet massique. Sa performance, quel que soit le niveau de remplissage, demeure faible. Les résultats obtenus sont présentés au tableau 3.

TABLEAU 3 : ESSAIS AVEC DE L'EAU

Descriptions		Réduction de bruit
niv. d'eau à l'intérieur	niv. d'eau à l'extérieur	dB(A)
0	0	0
5 ½ po du bord supérieur	0	3,0
plein	0	3,5
vide + poids	5 ½ po du bord supérieur	3,5
5 ½ po du bord supérieur	5 ½ po du bord supérieur	6,4
vide	eau permettant flottaison	7,6
vide + poids	niveau d'eau le plus élevé possible	6,5
5 ½ po du bord supérieur + poids	niveau d'eau le plus élevé possible	7,8
plein (débordant)	niv. permettant passage de la bille servant à exciter la structure	22,0

2.3.3 Essais sur l'amortissement apporté à l'eau par une enveloppe de plastique et l'ajout d'un produit coagulant

Comme on peut le voir au tableau 4, les essais où l'intérieur de l'élément de barbecue est rempli d'eau contenue dans une enveloppe de plastique recyclé (0,03 mm) (sac de poubelle) montrent une réduction additionnelle de 6 dB(A). L'enveloppe de plastique contribue donc de manière significative à l'effet amortissant de l'eau. Cette performance s'avère légèrement meilleure que celle obtenue lors des essais où la viscosité de l'eau est augmentée par l'ajout de gélatine. D'ailleurs, dans ce dernier cas, la présence d'une enveloppe de plastique n'apporte aucune amélioration. D'autres essais, non présentés dans ce tableau,

ont montré qu'une enveloppe plus épaisse (0,09 mm) que le sac poubelle était moins efficace. Dans tous ces essais, un coussin de mousse, placé sous l'élément de barbecue, a été utilisé pour supprimer l'effet possible du rayonnement acoustique de la table support.

**TABLEAU 4 : ESSAIS AVEC DE L'EAU RENDUE VISQUEUSE
ET UNE ENVELOPPE DE PLASTIQUE**

Descriptions*	Réduction de bruit dB(A)
Vide	0
Gélatine moulée dans l'élément	13,2
Eau dans un sac plastique	14,8
Eau sans enveloppe	7,7
Gélatine dans un sac plastique	13,1
Gélatine brisée, sans enveloppe	13,0

* Élément de barbecue reposant sur un coussin de mousse.

2.3.4 Essais sur l'augmentation de la rigidité de la structure

Nous avons augmenté la rigidité de la structure au moyen d'entretoises installées à l'intérieur de l'élément de barbecue entre les parois opposées. L'effet de rigidité a ensuite été testé en combinaison avec de l'eau (contenue soit dans un sac de plastique, soit dans de petits tubes) à différents niveaux de remplissage. Les résultats de ces essais sont présentés au tableau 5.

TABLEAU 5 : ESSAIS D'AUGMENTATION DE LA RIGIDITÉ COMBINÉE À DE L'EAU, DE LA MOUSSE ET UNE ISOLATION PAR COUSSIN DE MOUSSE

Essais sur coussin de mousse	Réduction de bruit dB(A)
Rigidité + 1 po d'eau dans un sac de plastique	13,4
Rigidité + 2 po d'eau dans un sac de plastique	14,5
Rigidité + 3 po d'eau dans un sac de plastique	15,2
Rigidité + 4 po d'eau dans un sac de plastique (= à 5 po du bord supérieur)	15,5
Rigidité + amortissement intérieur (mousse)	10,5
Rigidité + amortissement intérieur + sac avec de l'eau	14,8
Rigidité + amortissement int. et ext. + sac avec de l'eau	14,3
Amortissement int. et ext. + sac avec de l'eau	11,1
Amortissement intérieur + sac avec de l'eau	9,5
Élément rempli de mousse à l'intérieur	9,3
Vide - vide sur mousse partielle	0,2
Vide - vide sur mousse	0,1
Vide - vide sans mousse	0,0
Coussin de 1 po d'eau à l'int. + petit tube d'eau sur les parois, élément sur coussin mousse à l'extérieur	6,2
Petit tube d'eau dans le fond de l'élément à l'intérieur, sur mousse à l'extérieur	1,6
Coussin mousse de sous-tapis à l'intérieur + petit tube d'eau par dessus, élément sur coussin mousse à l'extérieur	3,5
Coussin mousse de sous-tapis à l'intérieur seulement, élément sur coussin mousse à l'extérieur	3,3

On constate que la rigidité a une légère influence sur la diminution du niveau de bruit. D'autre part, l'eau dans de petits tubes n'est pas aussi efficace que l'eau dans un sac. Enfin, l'isolation par coussin de mousse n'a presque aucune influence.

2.3.5 Essais avec de la laine de verre

Nous avons ensuite effectué des essais avec de la laine de verre recouverte d'une feuille de plomb pour réaliser des encoffrements partiels de la structure. Les résultats obtenus sont fournis au tableau 6.

TABLEAU 6 : ESSAIS AVEC LAINE DE VERRE

Descriptions				Réduction de bruit dB(A)
niv. d'encoffrement intérieur	niv. d'encoffrement extérieur	coussin	masse (kg)	
0	0	air	0	0,6
0	0	mousse	0	2,7
0	0	mousse	5	4,4
0	0	mousse	15	4,4
0	0	mousse	2,5	3,5
5½ po du bord sup.	0	mousse	0	12,6
5½ po du bord sup.	0	0	0	7,9
5½ po du bord sup.	5½ po du bord sup.	0	0	12,5
0	5½ po du bord sup.	0	0	0,3

Il s'avère que l'encoffrement intérieur (avec coussin de mousse en dessous) est le plus efficace : la réduction obtenue est de 12,6 dB(A). L'ajout d'une masse à l'intérieur n'a toutefois pas d'incidence notable.

3. ANALYSE ERGONOMIQUE

L'analyse détaillée des différentes positions et des mouvements effectués par l'opérateur est donnée dans le tableau comparatif des postes de travail avant et après l'implantation de la solution (section 4.2, tableau 8). Un aperçu des différentes positions et mouvements de l'opérateur au cours d'une opération est donné par les six photos de la figure 1.

En résumé, les points problématiques dans ce travail répétitif sont :

- l'élévation des bras au-dessus de l'épaule,
- l'angle des poignets,
- la manipulation d'un poids d'environ 4 kg (élément de barbecue).

4. DÉVELOPPEMENT DE LA SOLUTION

4.1 Aspects acoustiques

4.1.1 Mise au point d'un prototype

Le sable, combinant l'effet massique et l'effet amortissant, est en principe le meilleur matériau pour la réduction des niveaux de bruit. Cependant, la mise en oeuvre d'une solution utilisant ce matériau s'avère difficile, tant à cause du poids qui en résulte que de la nécessité de le maintenir en contact étroit avec les parois de la pièce. Nous avons tenté de contourner cette dernière difficulté en

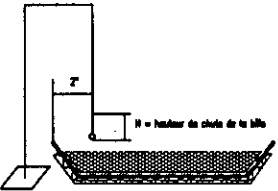
confectionnant des compartiments en bâche pour retenir le sable. Or, la performance du sable dans ces conditions s'est tellement dégradée que cette approche n'a pas été retenue. De plus, l'utilisation de cette solution demande beaucoup de temps chaque fois que l'opérateur passe à une nouvelle pièce. Nous avons donc réorienté la recherche sur la combinaison des effets de barrière acoustique, d'amortissement et de rigidité et l'utilisation de matériaux suffisamment légers. Les résultats de ces essais sont présentés au tableau 7.

Une mousse de polyuréthane rigide a été utilisée dans un premier temps pour ses propriétés de barrière acoustique (lorsqu'utilisée en grande épaisseur), de rigidité et de légèreté ainsi que pour sa capacité à épouser la forme de l'élément de barbecue. Ce matériau seul contribue déjà à des réductions de 5 dB(A) (polyuréthane à l'intérieur) et de 8,3 dB(A) (polyuréthane à l'intérieur et à l'extérieur).

Ensuite, deux matériaux ont été utilisés en couches. Le premier est un matériau amortissant constitué par une mousse d'élastomère à cellules fermées habituellement utilisée pour l'isolation thermique (le produit utilisé pour les essais a pour nom commercial Armaflex^{mc}). Le deuxième est un matériau formant une barrière acoustique constitué par un écran en plastique souple à forte densité recouvert d'une mousse absorbante (le produit utilisé pour les essais a pour nom commercial Barymat C^{mc}). Les deux couches sont maintenues en place par un caisson en contreplaqué à l'extérieur et par des morceaux de contreplaqué entretroisés à l'intérieur. La partie mousse du matériau barrière est placée en contact avec l'élément de barbecue. La performance de ces deux matériaux est sensiblement meilleure que celle de la mousse de polyuréthane rigide.

Finalement, les meilleurs résultats ont été obtenus en combinant le meilleur résultat pour l'extérieur, c'est à dire le matériau amortissant dans un caisson de contreplaqué et, pour l'intérieur, une combinaison où le matériau barrière est maintenu en place par une mousse de polyuréthane rigide.

TABLEAU 7 : ESSAIS DE MISE AU POINT DU PROTOTYPE

Schéma du montage	Conditions Intérieures	Conditions extérieures	Réduction dB(A)
	0	polyuréthane	5
	polyuréthane	polyuréthane	8,3
	0	matériau amortissant	7
	matériau amortissant	matériau amortissant	11
	0	matériau barrière	5
	matériau barrière	0	13
	matériau barrière + polyuréthane	polyuréthane	14,8
	mat. barrière + polyuréthane	matériau amortissant	20

4.1.2 Évaluation des performances acoustiques du prototype

Étant donné que le niveau de bruit fluctue lors de l'opération d'ébarbage, des essais en laboratoire ont été effectués dans des conditions proches de l'opération réelle, soit en ébarbant deux arêtes opposées délimitant deux surfaces planes de l'élément de barbecue : une grande surface (arête 1) et une petite surface (arête 2) (voir figure 4). Ces opérations d'ébarbage ont été effectuées sur un couvercle simplement posé sur une table (procédé original) et sur le prototype. L'évolution temporelle complète des niveaux est donnée pour les deux cas aux figures 5 et 6. On peut observer une réduction du bruit de l'ordre de 10 dB(A).

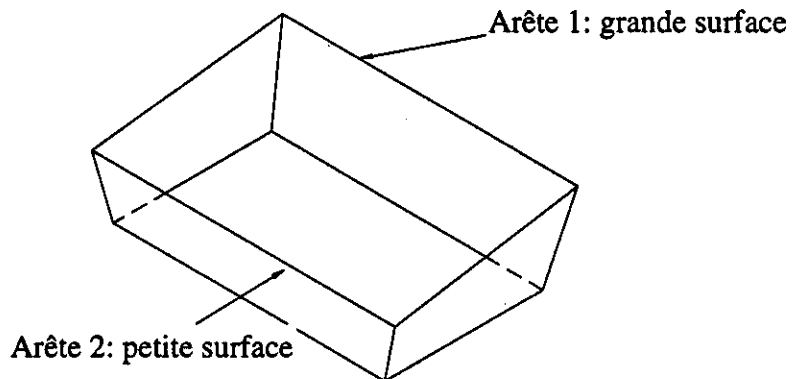
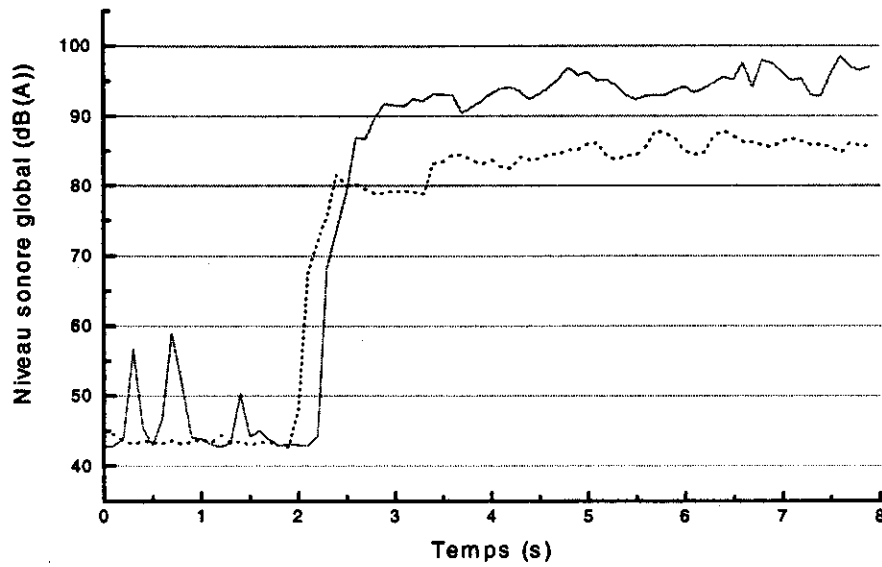
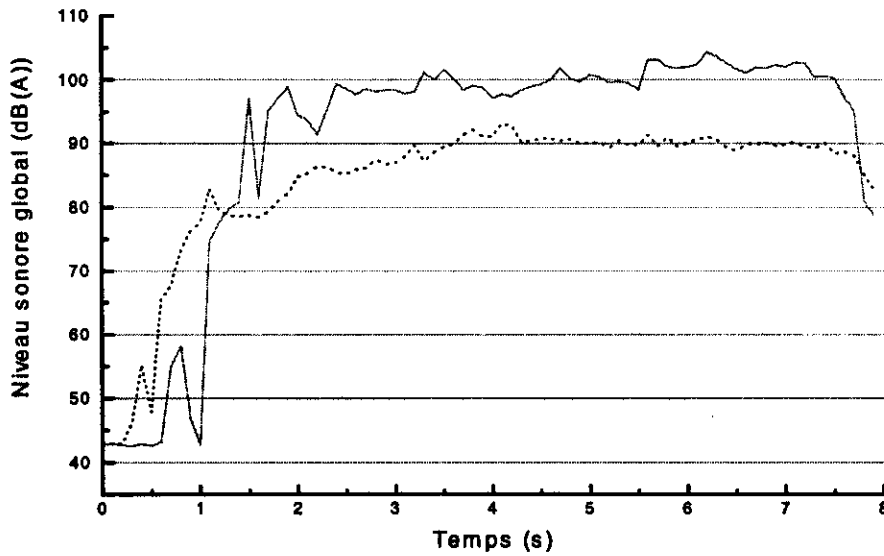


Figure 4 : Identification des arêtes 1 et 2 sur lesquelles sont faits les essais d'évaluation du prototype



**Figure 5 : Évolution du niveau de bruit pendant l'ébarbage de l'arête 1
(..... Prototype _____ Situation d'origine)**



**Figure 6 : Évolution du niveau de bruit pendant l'ébarbage de l'arête 2
(..... Prototype _____ Situation d'origine)**

4.2 Autres aspects ergonomiques

Les problèmes ergonomiques mentionnés dans la section 3 et repris en détail à la deuxième colonne du tableau 8 sont dus au fait que l'élément de barbecue est maintenu sur une table par une seule main de l'opérateur. La solution proposée est de placer l'élément de barbecue sur un support facilement orientable. Plus spécifiquement, le support doit comporter un axe autour duquel l'élément tourne librement afin que l'opérateur puisse faire un tour complet à la pièce pour l'ébarber. Cet axe de rotation doit être ajustable par rapport à la verticale pour permettre à l'opérateur de choisir le meilleur angle de travail (pièce-outil). Dans le cas du prototype, un trépied vidéo a été utilisé en inversant la tête pivotante pour obtenir les axes de rotation voulus. Cependant, d'autres systèmes peuvent être adaptés ou réalisés pour permettre d'obtenir deux axes, tel que représenté à la figure 7.

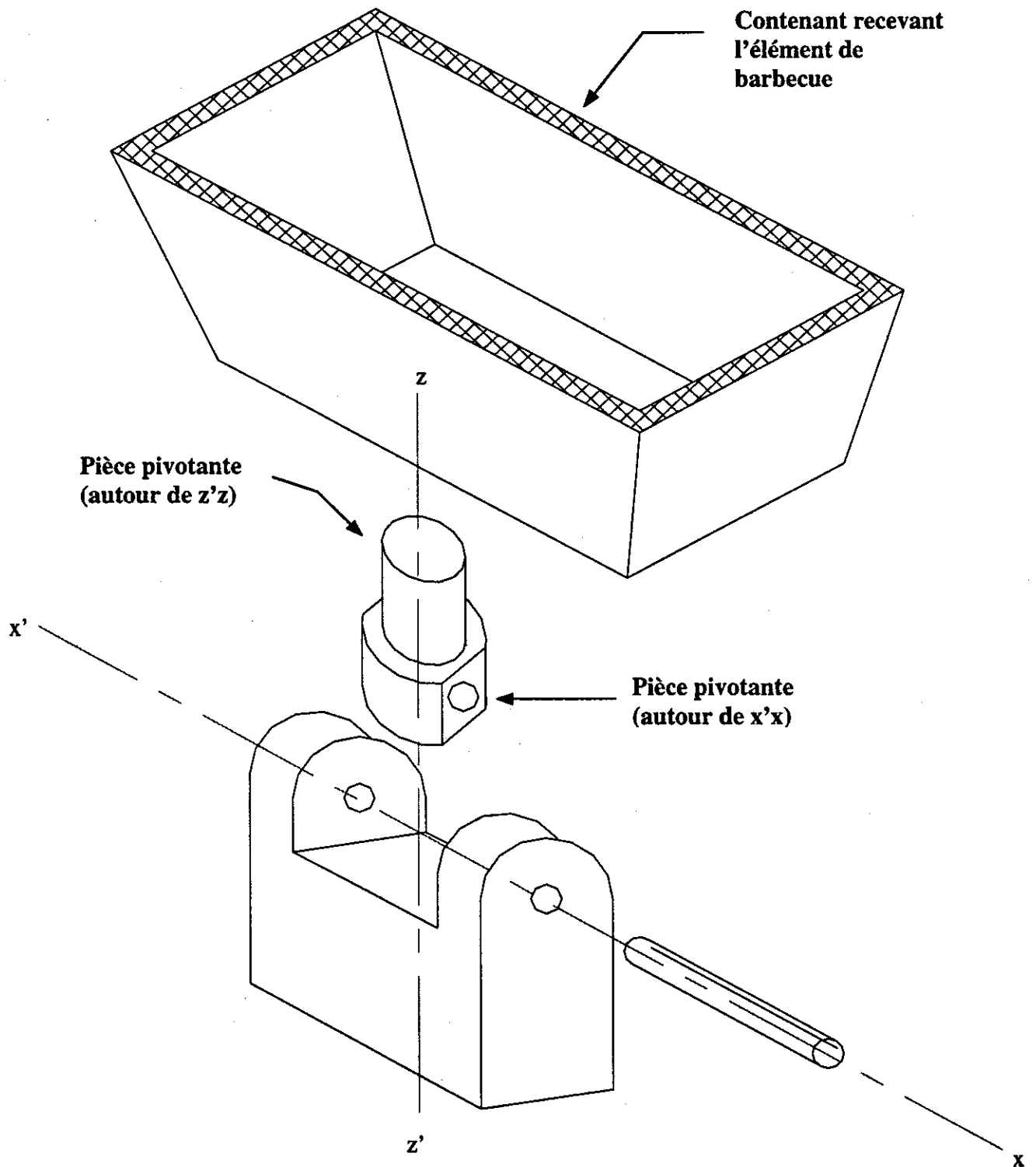


Figure 7 : Principe du support articulé

Comme on peut le voir à la troisième colonne du tableau 8, cette conception articulée du support de l'élément de barbecue répond à tous les aspects des problèmes ergonomiques.

**TABLEAU 8 : COMPARAISON DES ASPECTS ERGONOMIQUES
DES POSTES DE TRAVAIL**

Paramètres	Poste original	Poste développé
Poids	L'opérateur manipule d'une seule main un poids atteignant 4 kg.	L'opérateur ne manipule aucun poids, la pièce étant supportée.
Élévation des bras au-dessus de l'épaule	L'opérateur maintient la pièce avec le bras élevé au-dessus de l'épaule. Parfois la main tenant l'outil atteint des positions similaires.	La pièce étant supportée, le problème d'élévation des bras tenant la pièce est écarté. La zone à ébarber est ramenée dans la position optimale.
Angle des poignets	L'opérateur positionne ses mains à des angles assez prononcés par rapport au prolongement des bras pour atteindre certains points de la pièce.	L'opérateur oriente la pièce et présente la partie à ébarber dans une position ergonomique.
Soulagement de la main tenant l'outil	L'opérateur n'a aucune possibilité de tenir l'outil à deux mains si nécessaire, puisque l'autre main est condamnée à tenir la pièce.	L'opérateur a la possibilité d'utiliser les deux mains en cas de nécessité de contrôle plus accentué.
Effort permanent de la main tenant l'outil	L'opérateur applique en permanence le mouvement d'avance à l'outil alors que la pièce est fixe.	L'opérateur peut aussi garder l'outil fixe et faire avancer la pièce.

Risque d'accident	Le risque d'échapper la pièce pendant l'ébarbage et le risque de blessure sont plus élevés.	Aucun risque, puisque la pièce est supportée.
Qualité du travail	L'opérateur se fatiguant davantage, la qualité de son travail peut être affectée.	L'opérateur se fatiguant moins, il en résulte un meilleur contrôle de la qualité du travail.
Vibrations émises par la pièce	L'opérateur tenant la pièce d'une main pendant l'usinage, il subit toutes les vibrations transmises par la pièce.	La pièce étant supportée, aucune transmission de vibrations par la pièce à l'opérateur.
Vibrations émises par l'outil	La pièce vibrant davantage sur la table, l'opérateur subit plus de vibrations en permanence.	La pièce vibrant moins dans son caisson, l'opérateur subit moins de vibrations.
Effet sur la santé de l'opérateur	À long terme, l'opérateur risque des lésions attribuables aux travaux répétitifs (L.A.T.R.).	Aucun risque évident de L.A.T.R.

4.3 Spécifications du prototype

Le prototype final est présenté à la figure 8 et par les trois photos de la figure 9. Ses éléments principaux sont les suivants :

- le trépied support permettant le réglage en hauteur;
- le joint d'articulation permettant la rotation selon deux axes;
- le caisson recevant l'élément à ébarber;
- la mousse de polyuréthane coulée épousant la forme interne de l'élément à ébarber, recouverte d'une épaisseur de matériau barrière, côté mousse à l'extérieur.

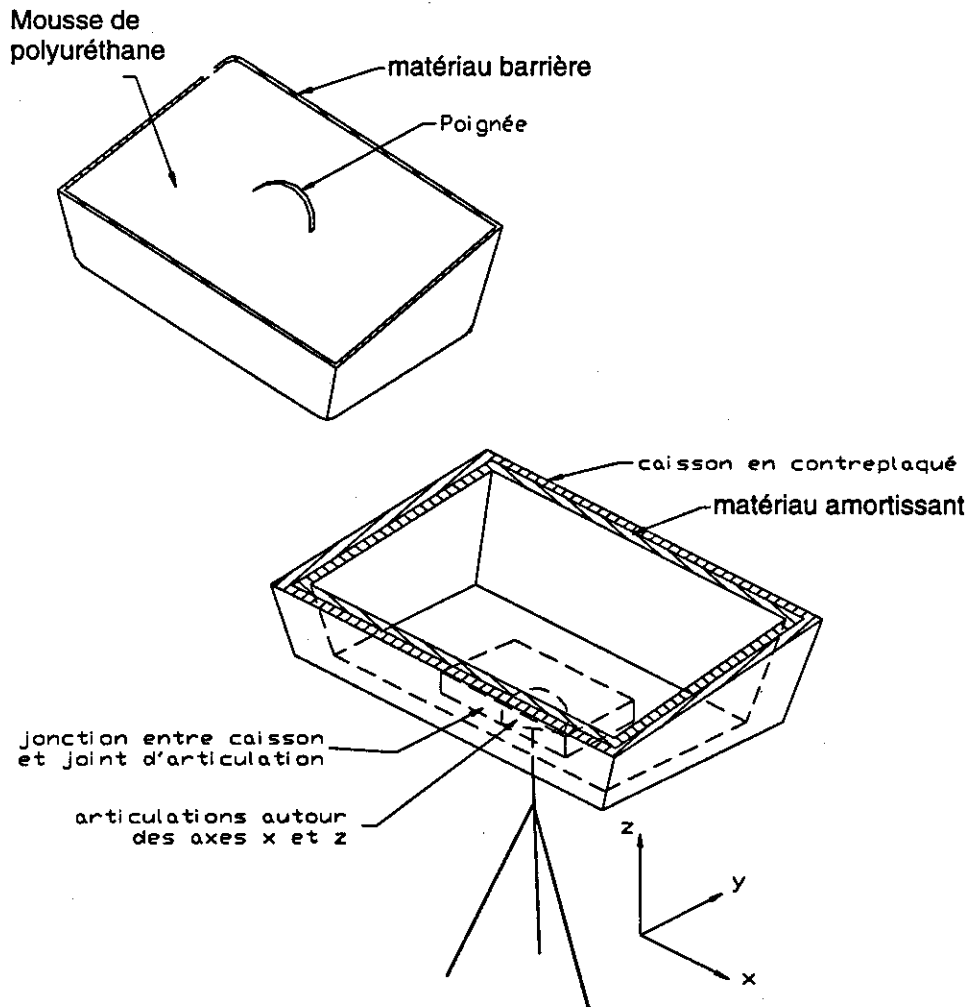


Figure 8 : Schéma du prototype développé

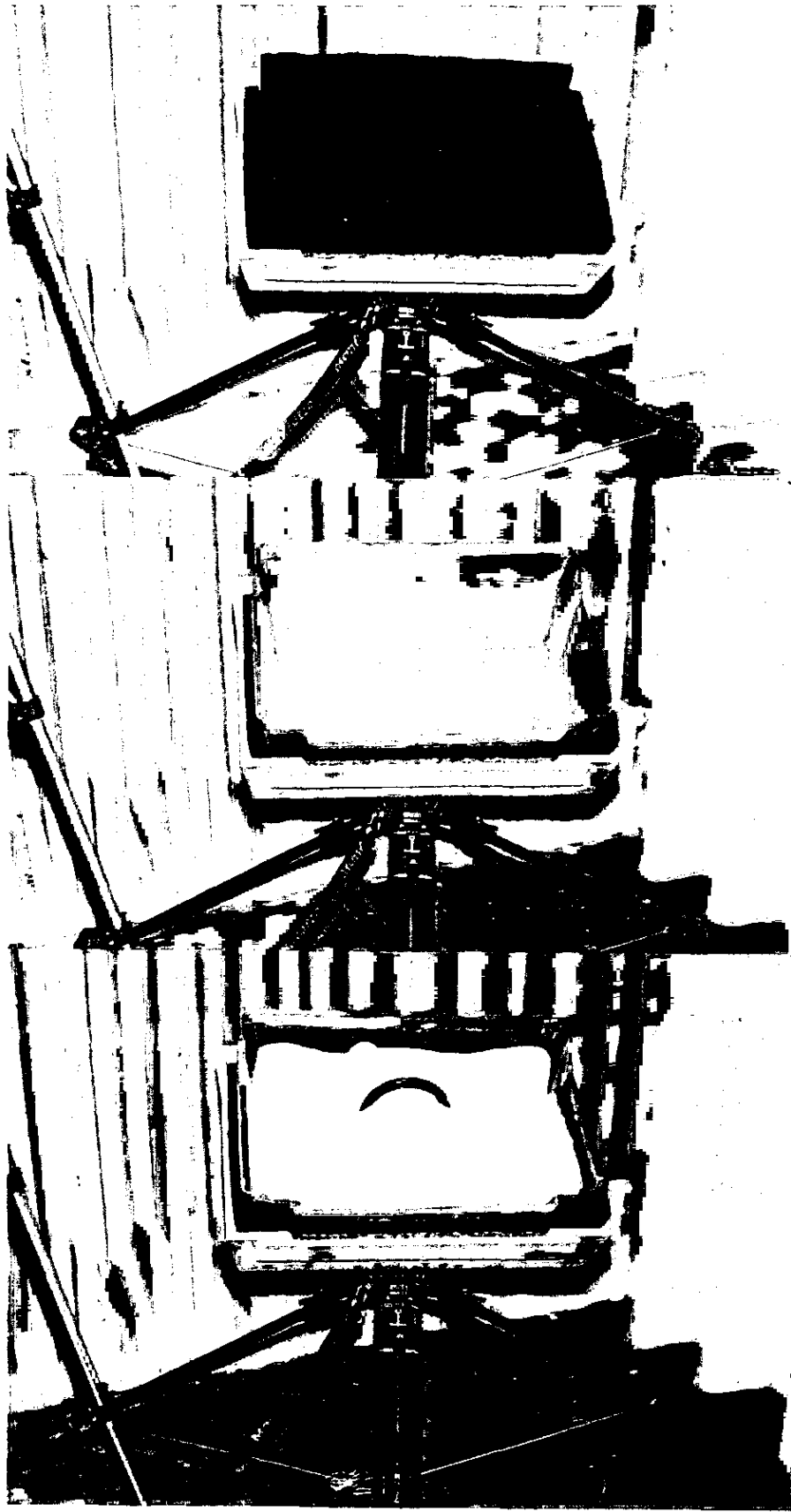


Figure 9: Prototype final. De haut en bas: caisson support, élément de barbecue dans son support et ensemble prêt pour l'ébarbage.

Pour travailler selon la solution développée, les étapes suivantes doivent être respectées :

1. Placer le trépied support du caisson à l'endroit prévu pour le poste de travail.
2. Mettre en place le caisson supportant l'élément à ébarber.
3. Régler la hauteur à un niveau confortable.
4. Placer l'élément à ébarber dans le caisson.
5. Placer la mousse de polyuréthane dans l'élément à ébarber.
6. Procéder à l'opération tout en orientant les zones à ébarber de manière à travailler en position confortable tout au long de l'opération.
7. À la fin de l'opération, enlever la mousse de polyuréthane, enlever l'élément ébarbé et répéter les étapes 4 à 6.

La figure 10 montre d'une façon schématique la mise en place de l'élément à ébarber.

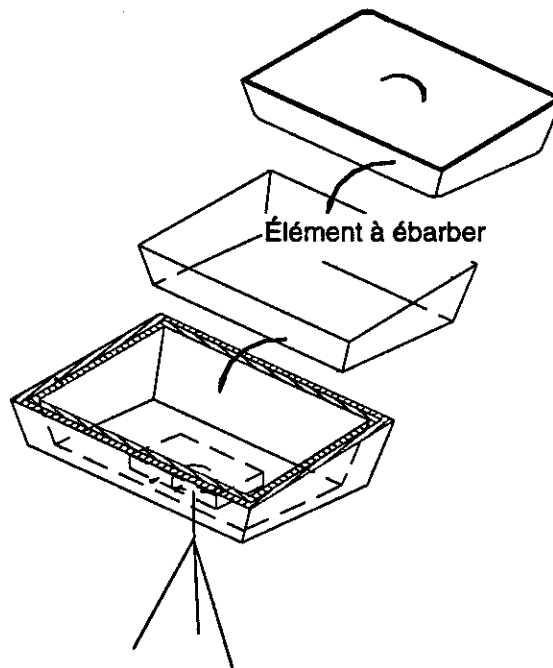


Figure 10 : Mise en place de l'élément à ébarber

Suite à une demande particulière d'EDC, un autre prototype a également été réalisé pour répondre à un cas d'ébarbage sur la surface extérieure du barbecue. La figure 11 donne une représentation schématique de ce second prototype. Plus généralement, on peut envisager des traitements internes ou externes, avec ou sans axes d'articulation.

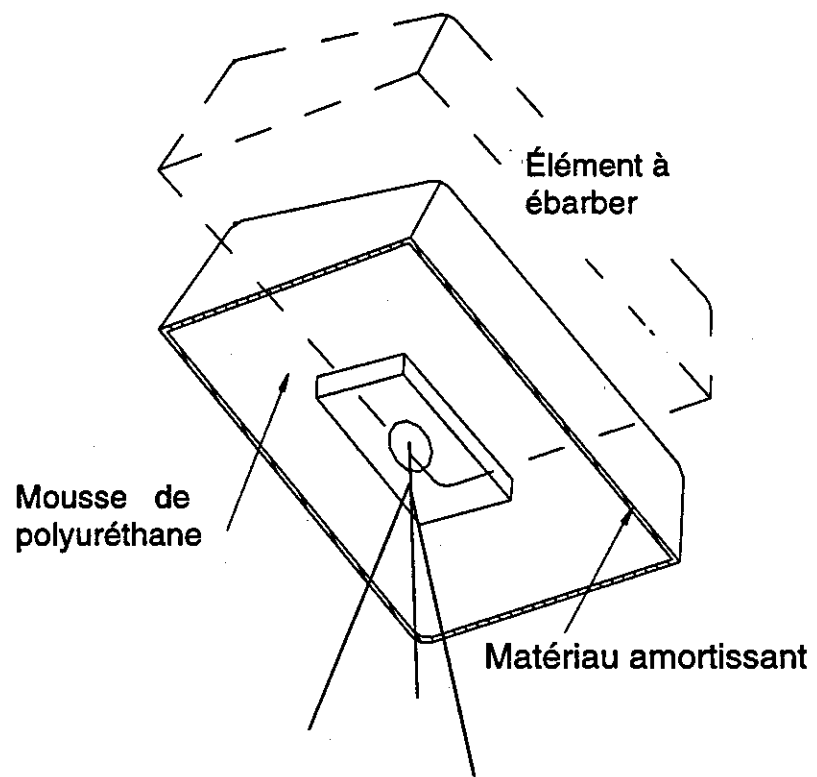


Figure 11 : Autre prototype

Des renseignements plus spécifiques pour la réalisation de ce montage sont donnés au tableau 9, qui contient les références des matériaux utilisés et, à la figure 12, qui illustre leur utilisation.

Tableau 9 : Liste et coût des matériaux utilisés pour la réduction du bruit d'ébarbage des barbecues

<u>Matériau</u>	<u>Quantité</u>	<u>Prix unitaire</u>	<u>Total</u>
Matériau amortissant : mousse d'élastomère à cellules fermées (produit utilisé pour les essais : Armaflex ^{mc} épaisseur 3/4 po).	2,5pi x 4pi = 10 pi ²	6,19 \$ / pi ²	61,90 \$
Matériau barrière acoustique : écran en plastique souple à forte densité recouvert d'une mousse absorbante (produit utilisé pour les essais : Barymat C ^{mc}).	2,5pi x 4pi = 10pi ²	4,87 \$ / pi ²	48,70 \$
Mousse de polyuréthane obtenue par mélange de : - Résine d'uréthane mélangée - Solution de diisocyanate de diphénylméthane (activateur).	1 gallon 1 gallon		136,50 \$
Colle contact (produit utilisé pour les essais : adhésif 520 de Armstrong ^{mc}).	500 ml		5,95 \$
Contre-plaqué de 3/4 po pour le caisson support.	4pi x 8pi	24,95 \$	24,95 \$
Total			278,00 \$

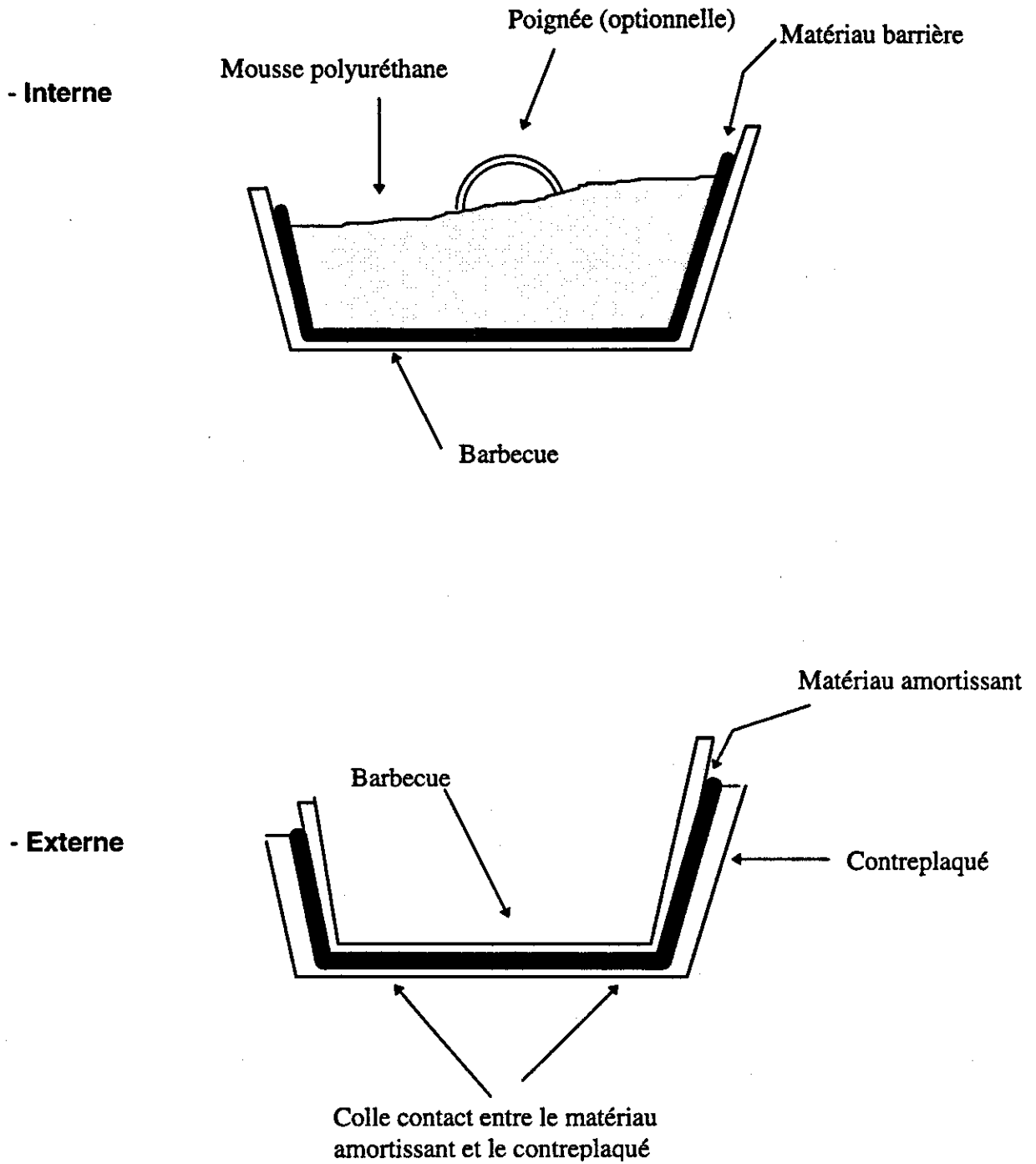


Figure 12 : Utilisation des matériaux pour la réalisation du montage

5. ASPECTS COMPLÉMENTAIRES

5.1 Étude de l'outil

Comme il a été noté lors du diagnostic des sources de bruit (section 2.2), l'outil n'est pas une source de bruit dominante. Du point de vue des vibrations transmises aux mains, des mesures ont été effectuées en laboratoire selon la norme ISO 5349. Les résultats sont présentés au tableau 10 pour l'outil fonctionnant à vide² et au tableau 11 pour l'outil en mode normal d'opération. La norme indique la durée d'exposition nécessaire avant l'apparition des symptômes vasculaires liés à la maladie de Raynaud (aussi appelée syndrome de Raynaud, ou « doigt blanc ») en fonction de l'accélération pondérée efficace pour des percentiles choisis de la population exposée. Les mesures des vibrations prises sur l'outil d'ébarbage nous donnent des valeurs entre 25 m/s² et 30 m/s². D'après la norme, l'exposition aux vibrations est d'assez courte durée avant l'apparition des symptômes de la maladie de Raynaud. Par exemple, pour une accélération pondérée efficace de 25 m/s² et pour 10 % des personnes qui développeront le symptôme aux vibrations, la durée d'exposition à ces vibrations sera d'environ quatorze (14) mois (travail de huit (8) heures par jour).

² C'est-à-dire sans contact avec la paroi de l'élément de barbecue.

**TABLEAU 10 : VALEURS DES VIBRATIONS DE L'OUTIL
FONCTIONNANT À VIDE**

Fréquence (Hz)	Accélérations mesurées a_i (m/s ²)	a_i^2 (m ² /s ⁴)	Accélérations pondérées $(a_i * k_i)^2$
6,3	1	0	0
8	1	1	1
10	3	9	9
12,5	7	51	51
16	12	156	156
20	14	182	117
25	19	361	143
31,5	19	353	88
40	22	506	81
50	26	671	60
63	27	734	46
80	29	858	34
100	34	1129	29
125	35	1197	19
160	38	1414	14
200	51	2611	17
250	42	1739	7
315	45	2034	5
400	110	12100	19
500	45	2043	2
630	72	5141	3
800	59	3516	1
1000	38	1444	0
1250	42	1772	0
Valeur globale $\sqrt{\sum(a_i^2)}$		200	
Valeur globale pondérée $\sqrt{\sum(a_i * k_i)^2}$			30

**TABLEAU 11 : VALEURS DES VIBRATIONS DE L'OUTIL
EN MODE NORMAL D'OPÉRATION**

Fréquence (Hz)	Accélérations mesurées a_i (m/s ²)	a_i^2 (m ² /s ⁴)	Accélérations pondérées $(a_i * k_i)^2$
6,3	0,4	0,1	0,1
8	1	1	1
10	2,7	7,3	7,3
12,5	5,4	29,7	29,7
16	10,6	112,4	112,4
20	13,5	182,2	116,6
25	13,1	171,6	68,1
31,5	19	361	90,2
40	16	256	41
50	19,1	364,8	32,8
63	20	400	25
80	24,8	615	24,6
100	23,3	542,9	13,9
125	33	1089	17
160	46,6	2171,6	21,7
200	30,3	918,1	5,9
250	31,2	973,4	3,9
315	96,9	9389,6	23,5
400	35,6	1267,4	2
500	37,8	1428,8	1,3
630	49,7	2470,1	1,5
800	33	1089	0,4
1000	31,5	992,2	0,3
1250	29,4	864,4	0,1
Valeur globale $\sqrt{\sum(a_i^2)}$		160,3	
Valeur globale pondérée $\sqrt{\sum(a_i * k_i)^2}$			25,3

5.2 Traitement acoustique de l'atelier

Nous avons mesuré les temps de réverbération par bande d'octave et les avons utilisés comme base de calcul pour déterminer la réduction de bruit que pourrait apporter un traitement acoustique de l'atelier. Le traitement envisagé porte sur la zone du plafond correspondant à l'aire où ont lieu les activités d'ébarbage (voir figure 13). En pratique, on pourrait utiliser des baffles verticaux d'une surface totale égale à la surface de plafond concernée. Les calculs sont faits pour des baffles de laine de verre de 2 pouces d'épaisseur. Les résultats par bande d'octave ainsi que les formules utilisées pour les calculs sont donnés au tableau 12. La réduction de bruit obtenue en champs diffus, c'est-à-dire celle dont bénéficient les opérateurs éloignés de la source sonore, est de plus de 3 dB dans les bandes de 500 à 8000 Hz, ce qui correspond, vu les niveaux élevés et uniformes du spectre dans cette zone, à une diminution de la valeur globale de plus de 3 dB(A). Même si ce résultat peut paraître faible, il faut prendre en considération le gain de confort acoustique dû à la diminution de la réverbération du local. En effet, le temps de réverbération serait diminué de moitié.

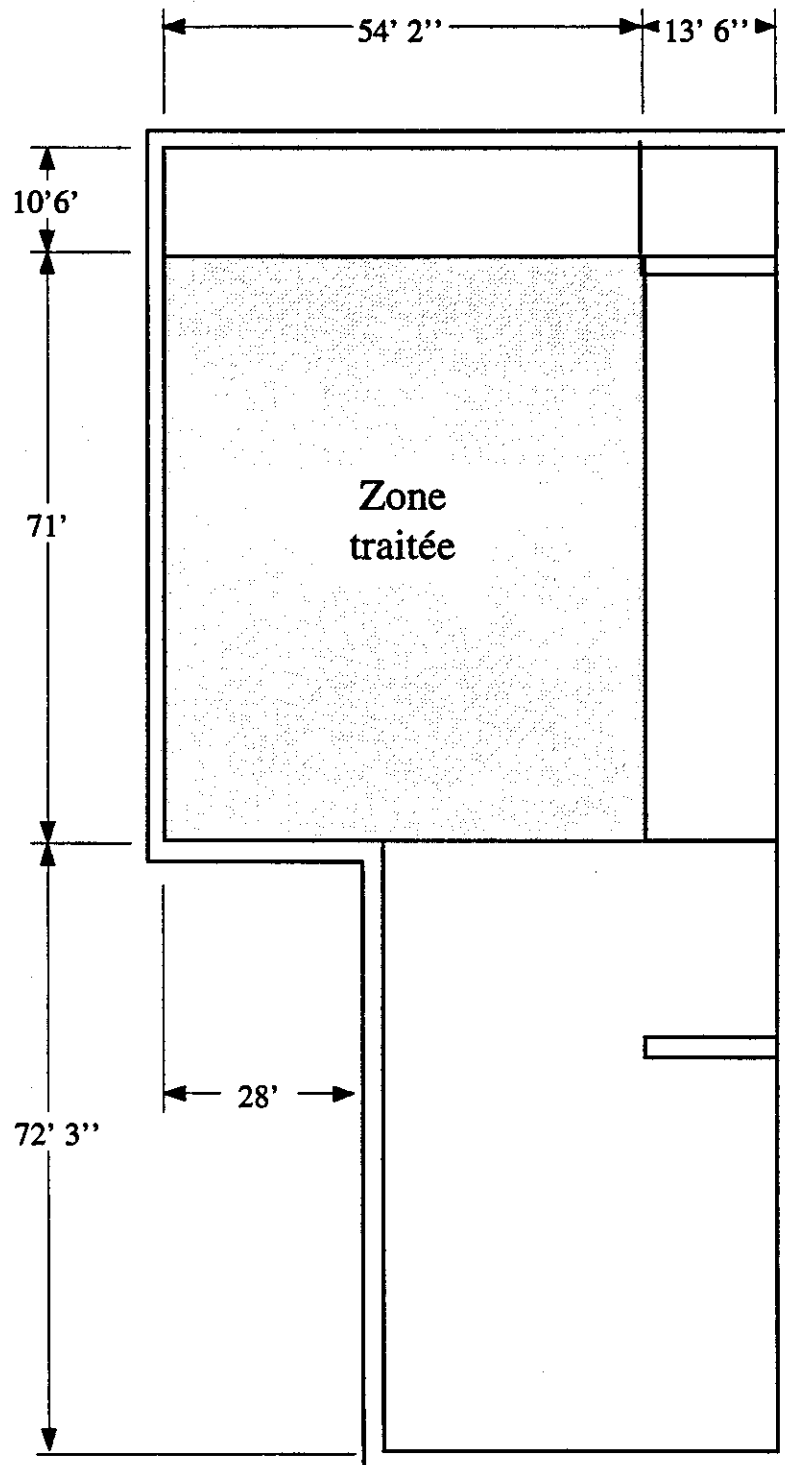


Figure 13 : Traitement acoustique de l'atelier : localisation et dimensions de la zone de plafond traitée avec des baffles acoustiques

TABLEAU 12 : TRAITEMENT DU PLAFOND DU LOCAL : RÉSULTATS PAR BANDE D'OCTAVE ET FORMULES UTILISÉES POUR LES CALCULS

Fréquence (Hz)	Temps (sec) de réverbération (RT60)	$\alpha_1 =$ Coefficients d'absorption du local	$\alpha_2 =$ Coefficients d'absorption de la laine de verre	$\alpha_m =$ Coefficients d'absorption moyens résultants	$\Delta Lp =$ Réduction de bruit (dB(A))
125	1,70	0,167	0,24	0,179	0,3
250	1,65	0,172	0,77	0,267	2,4
500	1,60	0,178	1	0,309	3,2
1000	1,60	0,178	1	0,309	3,2
2000	1,60	0,178	1	0,309	3,2
4000	1,60	0,178	1	0,309	3,2
8000	1,55	0,184	1	0,314	3,1

$V = \text{Volume de l'usine} = 4000 \text{ m}^3$
 $S_t = \text{Aire des parois de l'usine} = 2250 \text{ m}^2$
 $\alpha = \text{Coefficient d'absorption}$

$$\Rightarrow \alpha_1 = 0,16 V / S_t \cdot T_r$$

$S_1 = \text{Surfaces non traitées} = 1890 \text{ m}^2$
 $S_2 = \text{Surface du plafond traitée avec laine de 2 po d'épaisseur} = 360 \text{ m}^2$
 $\alpha_2 = \text{Voir spécifications}$

$$\Rightarrow \alpha_{mi} = (S_1 \cdot \alpha_{1i} + S_2 \cdot \alpha_{2i}) / S_t$$

$$Lp_{1i} = Lw + 10 \log_{10} [(1 - \alpha_{1i})^4 / S_t \cdot \alpha_{1i}]$$

$$Lp_{2i} = Lw + 10 \log_{10} [(1 - \alpha_{mi})^4 / S_t \cdot \alpha_{mi}]$$

Réduction du niveau de bruit de la fréquence i :

$$\Rightarrow \Delta Lp_i = Lp_{1i} - Lp_{2i} = 10 \log_{10} [(1 - \alpha_{mi})^4 \alpha_{1i} / (1 - \alpha_{1i})^4 \alpha_{mi}]$$

6. CONCLUSION

Ce projet a atteint son objectif, qui était de tester certaines techniques de réduction de bruit et de les appliquer au cas de l'ébarbage de pièces d'aluminium coulées (cuves et couvercles de barbecues). Après le diagnostic, qui a fait ressortir le rayonnement acoustique de l'élément de barbecue comme la source dominante de bruit, le potentiel respectif de plusieurs principes de solution a été évalué expérimentalement. Le développement d'une solution a consisté à rechercher des matériaux et un montage de ceux-ci permettant de construire un prototype respectant les principes de solution dont le potentiel avait été démontré. En outre, le prototype devait respecter les contraintes suivantes : être léger, maniable, simple et peu coûteux à réaliser. La prise en compte des aspects ergonomiques a conduit à proposer un support articulé et mobile en rotation. Celui-ci résout les problèmes ergonomiques liés au fait que, dans le procédé original, la pièce était manipulée par une seule main pendant que l'autre main actionnait l'outil d'ébarbage.

L'originalité de ce projet consiste en l'évaluation expérimentale qui a été faite des performances acoustiques de nombreux matériaux et de leurs combinaisons. Cette évaluation a une retombée importante pour la recherche conduite par l'ÉREST sur la réduction du rayonnement acoustique des structures des produits manufacturés lorsqu'un procédé de fabrication engendre une excitation vibratoire de la structure : elle a mis en évidence la grande variété des solutions technologiques possibles pour réduire le rayonnement acoustique et, en particulier, la diversité des matériaux et des combinaisons de matériaux pouvant servir à réaliser un support adapté à la structure rayonnante.