

# Etude de la qualité sonore de lave-linges domestiques

Jean-François Petiot

Ecole Centrale de Nantes, IRCCyN, UMR CNRS 6597  
Nantes, France  
jean-francois.petiot@ircyn.ec-nantes.fr

César Lacroix, Elliot Catherin

Ecole Centrale de Nantes  
1 rue de la Noë  
Nantes, France

**Résumé**—La qualité sonore des produits de notre environnement est importante et participe à leur acceptation par le consommateur ainsi qu'au fondement de la qualité perçue. Ce travail présente une étude perceptive du son de lave-linges domestiques. A partir d'enregistrements d'une machine à laver réelle, un plan d'expériences a été défini en appliquant différents types de filtrages au son initial. Sur cet espace produit constitué de différents sons, une étude perceptive impliquant un panel d'auditeurs, chargés d'évaluer la qualité globale et l'acceptabilité des sons de lavage à l'aide du différentiel sémantique, a été menée. Une modélisation des dimensions de la qualité perçue a été réalisée avec l'analyse de la variance, afin d'expliquer les dimensions perceptives par les caractéristiques des filtres appliqués. Les résultats permettent de déterminer l'influence des paramètres du signal sur la qualité perçue, afin d'envisager des actions correctives sur le design du lave linge.

**Mots-clés**—psychoacoustique, qualité sonore, filtrage audio, modélisation de données, évaluation sensorielle

## I. INTRODUCTION

Le son des produits qui nous entourent et avec lesquels nous interagissons est important dans l'expérience de l'utilisateur. Il doit être géré, « designé » au même titre qu'une forme ou une couleur [1]. Le son produit par exemple par un lave-linge ou un sèche-linge lors de son fonctionnement peut constituer une piste intéressante pour un fabricant qui souhaite augmenter la satisfaction client. Ce son conditionne l'acceptabilité du produit et plus généralement sa qualité perçue [2]. Un enjeu important pour un constructeur de lave-linge est donc de comprendre les réactions des utilisateurs aux sons générés par le produit, afin de mieux maîtriser la qualité perçue. Cette compréhension passe par une analyse des attributs du signal sonore générant des réactions positives ou négatives de la part de l'utilisateur, puis ensuite par une identification des sources de bruit dans le système, potentiellement responsables des signaux générés [3]. L'étape suivante consiste pour le constructeur à reconcevoir le système, à déterminer des actions correctives sur les organes (reconception - traitements acoustiques) qui auront un impact positif sur la qualité perçue.

Ce travail porte sur l'analyse des perceptions de sons d'un lave-linge, dans le but d'améliorer son acceptabilité. Après une présentation des matériels et méthodes utilisée dans le projet, les résultats de l'expérience sont présentés au paragraphe 3. Les apports principaux de ce travail sont synthétisés au paragraphe 4.

## II. MATERIEL ET METHODES

### A. Analyse du son d'un cycle complet d'une machine à laver

Un cycle complet de lavage d'une machine chargée (durée 39 mn) a été enregistré en chambre anéchoïque dans l'entreprise partenaire (S20 Industries). La prise de son a été effectuée en stéréo (fréquence d'échantillonnage 44100Hz et résolution numérique 16 bits). Deux micros électrostatiques APEX 191 IMP 2500 cardioïdes ont été utilisés. Les micros ont été distants d'environ 1m, à une hauteur de 1,5m, situés à environ 1,5 m du lave-linge, orientés vers le centre du lave-linge (préampli CANFORD, carte son VX Pocket V2). L'édition du fichier ".wav" a été faite par le logiciel d'édition audio AUDACITY. L'évolution du niveau sonore (en dBA) du cycle complet de lavage est donnée Figure 1. Les différentes phases du cycle peuvent être visualisées sur cette figure.

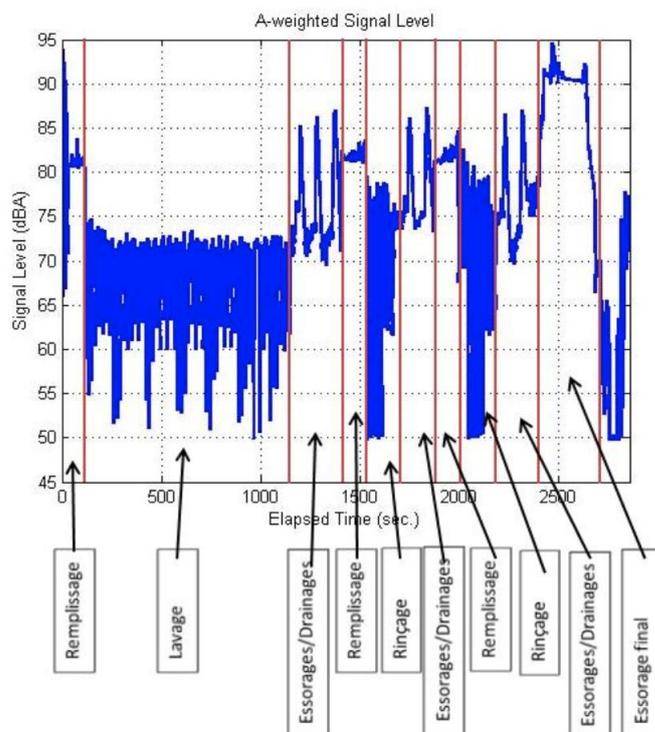


FIGURE 1: NIVEAU SONORE EN dBA EN FONCTION DU TEMPS POUR UN CYCLE COMPLET DE LAVAGE

Pour ce projet, deux phases ont été particulièrement étudiées :

- La phase « lavage », qui correspond au cycle le plus long,
- La phase « essorage final », car c'est le cycle dont le niveau sonore perçu est le plus élevé et donc le plus propice à la gêne.

Deux extraits sonores (durée environ 14 secondes) ont été sélectionnés sur ces deux phases. Des fondus-enchainés d'entrée et de sortie (fade-in et fade-out d'une durée de 1 seconde) ont été appliqués aux sons pour éviter les artefacts dus aux transitoires.

### B. Préparation des stimuli sonores

#### 1) Cycle de lavage

Le spectrogramme de l'extrait du son de lavage est donné figure 3. L'énergie du signal est concentrée principalement dans une bande de fréquence de 100 à 1500 Hz. L'analyse met en évidence une fréquence très énergétique à 100Hz, correspondant aux vibrations créées par la commande du moteur universel (à la fréquence du courant du secteur (50Hz) redressé, soit  $2 \times 50 = 100\text{Hz}$ ). Ce bruit est proportionnel au courant absorbé et donc au couple demandé. C'est en phase de lavage qu'il est le plus important. Pour atténuer cette transmission magnétique sur la carcasse/cuve assemblée, le moteur est fixé sur silentbloks. L'intensité de cette fréquence de 100Hz constitue le facteur F1 du plan expérimental. La seconde caractéristique du son est un bruit à bande étroite, entre 100 et 1500Hz, correspondant au bruit du linge et au brassage de l'eau. Il constitue le second facteur expérimental F2. Enfin, il est apparu intéressant de proposer une « harmonisation » du son de lavage, en générant artificiellement des composantes harmoniques de la composante à 100Hz. En effet, il est constaté dans de nombreuses études que les sons « harmoniques » sont plus agréables que les sons inharmoniques [4]. La présence de composantes harmoniques de la fréquence de 100Hz constitue le troisième facteur F3.

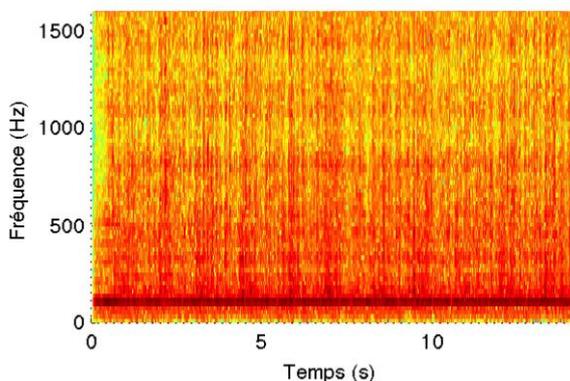


FIGURE 2: SPECTROGRAMME DE L'EXTRAIT DU SON DE LAVAGE

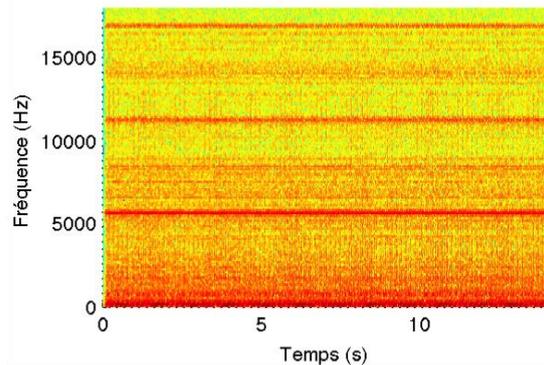


FIGURE 3: SPECTROGRAMME DE L'EXTRAIT DU SON D'ESSORAGE

Pour générer le plan expérimental (les différents stimuli sonores), différents filtres ont été réalisés (toolbox *FdaTools* de Matlab) pour manipuler le son initial :

- filtrage bande étroite centré sur 100Hz, pour le facteur F1 (filtre elliptique IIR)
- filtrage large bande entre 250Hz et 1000Hz pour le facteur F2 (filtre Chebyshev IIR)
- filtre en peigne pour le facteur F3 (filtre en peigne avec rétroaction)

Trois niveaux de filtrage ont été déterminés pour les facteurs F1 et F2, et 2 pour le facteur F3. Le plan expérimental (plan factoriel complet comportant  $3^2 \times 2 = 18$  stimuli) est donné dans la table 1.

sons	Facteur	Niveau bas (-1)	Niveau intermédiaire (0)	Niveau haut (+1)
lavage	F1	Atténuation de 10dB	Pas de filtrage	Renforcement +12dB
	F2	Atténuation de 10dB	Pas de filtrage	Renforcement +5dB
	F3	Pas de filtrage		Filtre en peigne, $\alpha = 0,6$
essorage	G1	Atténuation de 10dB	Pas de filtrage	Renforcement +5dB
	G2	Atténuation de 10dB	Pas de filtrage	Renforcement +5dB

TABLE 1: PLANS D'EXPÉRIENCES POUR LES SONS DE LAVAGE (PLAN COMPLET  $3^2 \times 2$ ) ET POUR L'ESSORAGE (PLAN COMPLET  $2^3$ )

#### 2) Cycle d'essorage

Le spectrogramme de l'extrait du son d'essorage est donné figure 3. Le bruit est large bande, avec trois composantes harmoniques (de fondamentale à 5600Hz) correspondant à la fréquence de rotation du moteur (sifflements caractéristiques de l'essorage). Le bruit de la commande du moteur à 100Hz n'est pas audible même s'il est toujours présent, masqué par des « claquements » générés par le tambour entre 100 et 5200 Hz. Le bruit harmonique de sifflement correspond au premier facteur expérimental (G1), les claquements au second facteur G2. Différents filtres ont été réalisés pour manipuler le son initial sur ces deux facteurs :

- filtrage stop bande centré sur les harmoniques pour le facteur G1 (filtre elliptique IIR)
- filtrage passe bande entre 300Hz et 5200Hz pour le facteur G2 (filtre elliptique IIR)

Le plan expérimental (plan factoriel complet comportant  $3^2 = 9$  stimuli) pour l'essorage est donné en table 1. Après filtrage des sons, les stimuli ont été normalisés en dBA afin de garantir un niveau standard entre tous les sons pour chaque banque sonore, et éviter que le niveau général du son soit le paramètre d'influence primordial sur la perception auditive des sujets

### C. Protocole expérimental et analyse

Tous les stimuli sonores ont fait l'objet d'un test d'écoute par un panel de 13 sujets volontaires. L'évaluation a consisté en une épreuve de cotation sur une échelle sémantique (épreuve monadique bipolaire) utilisant une interface de présentation des sons (figure 4) (écoute au casque Beyerdynamics DT 990 pro). Deux critères ont été évalués sur une échelle continue de -5 à 5 :

- **L'impression générale.** Evaluation générale de la qualité globale de la machine à laver.
- **L'acceptabilité** du son en tant que machine à laver. Le son de cette machine à laver est-il selon vous acceptable ?

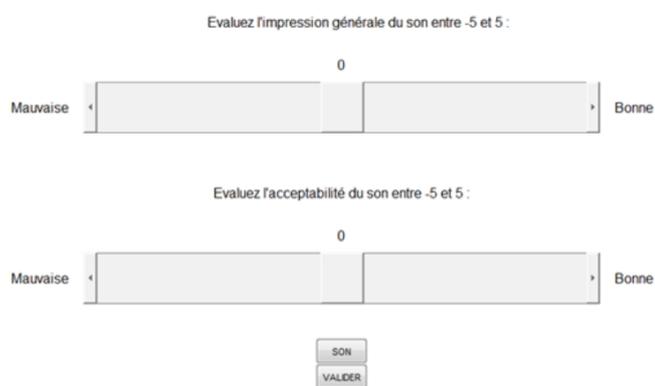


FIGURE 4: INTERFACE POUR L'ÉVALUATION QUANTITATIVE DES SONS DES 2 PLANS EXPÉRIMENTAUX

Dans chacune des deux banques sonores (lavage et essorage), les sons sont répétés deux fois, chaque présentation étant aléatoire entre les sujets.

Pour chaque descripteur, deux analyses de la variance sont réalisées. La première est une ANOVA à deux facteurs avec interaction, avec les facteurs "sujet", "son" et interaction sujet\*son. L'objectif est de déterminer dans quelles mesures le panel de sujets discrimine des différences entre les sons. La seconde est une ANOVA à plusieurs facteurs avec interactions, facteur sujet, facteurs F1, F2, F1\*F2, F3, F1\*F3, F2\*F3 d'une part pour les sons de lavage, et facteurs G1, G2, G1\*G2 d'autre part pour les sons d'essorage.

## III. RESULTATS

Les résultats montrent tout d'abord une corrélation très importante entre les deux descripteurs « impression générale » et « acceptabilité » (coefficient de corrélation  $R = 0,71$

( $p < 0,001$ ) pour essorage et  $R = 0,72$  ( $p < 0,001$ ) pour lavage). Les conclusions des ANOVAs étant les mêmes pour les deux descripteurs, seuls les résultats concernant le descripteur « acceptabilité » seront reportés.

L'analyse de la variance avec interaction avec les deux facteurs "sujet" et "son" montre des effets significatifs (F-test,  $p < 0,01$ ) pour les 2 facteurs et pour l'interaction. L'épreuve permet de mettre en évidence des différences significatives entre les sons mais également entre les sujets. Ce dernier résultat n'est pas surprenant, les sujets n'ayant pas suivi d'entraînement dans l'utilisation des échelles et pour la perception des descripteurs à l'écoute des sons.

### A. Cycle lavage

Seuls les facteurs « sujet », F1, F2, F3, présentent un effet significatif avec l'ANOVA (F-test,  $p < 0,01$ ). Le graphe des différents effets pour les facteurs F1, F2, F3 est donné figure 5.

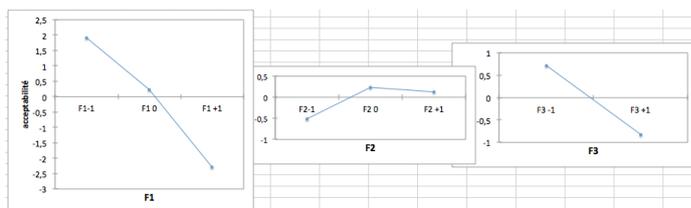


FIGURE 5: GRAPHE DES EFFETS DES DIFFÉRENTS FACTEURS POUR LES SONS « LAVAGE »

Pour le facteur F1, on obtient une courbe décroissante comme nous l'avions supposé : les sujets préfèrent les sons dont le niveau du moteur a été atténué ( $F1 = -1$ ). La fréquence énergétique à 100 Hz présente donc une gêne importante.

Pour le facteur F2, on observe que lorsque le bruit du linge est atténué, l'acceptabilité des sons est plus faible que lorsqu'il n'est pas modifié. La diminution de bruit du linge doit certainement faire ressortir le bruit du moteur, et n'est pas apprécié. Elle peut également rendre le son moins « naturel » et moins « typique » d'un son de lavage. Les sons dont le bruit de linge a été augmenté ( $F2 = +1$ ) sont un peu moins bien notés que si l'on ne l'avait pas modifié. La taille de l'effet du facteur F2 est faible devant celle du facteur F1.

La présence du filtre en peigne qui harmonise le son (facteur  $F3 = +1$ ) engendré une baisse d'acceptabilité. Ce résultat est contraire à nos attentes : harmoniser le bruit du moteur en créant des harmoniques du 100 Hz a dégradé l'acceptabilité. Une des causes peut être que cette harmonisation rend le bruit moteur encore plus présent.

Aucune interactions n'étant significative, les conclusions sont assez claires : la fréquence de 100 Hz du bruit du moteur est celle qui influe le plus sur l'acceptabilité.

### B. Cycle essorage

Les facteurs « sujet », G1, G2, G1\*G2 présentent un effet significatif avec l'ANOVA (F-test,  $p < 0,01$ ). Le graphe des différents effets est donné figure 6.

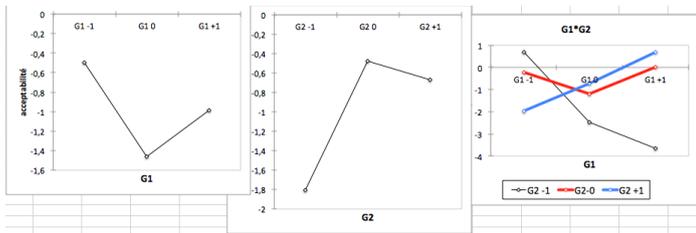


FIGURE 6: GRAPHE DES EFFETS DES DIFFERENTS FACTEURS POUR LES SONS « ESSORAGE »

On peut observer que lorsque l'on atténue le bruit du moteur ( $G1 = -1$ ), ou qu'on l'augmente ( $G1 = +1$ ), l'acceptabilité augmente par rapport au son du moteur original ( $G1 = 0$ ). Ce dernier résultat est contre-intuitif : on aurait plutôt estimé une courbe décroissante puisque l'amplification de fréquences aigües déjà énergétiques semblaient propices à la gêne.

Pour le filtre G2 (bruit de résonances du tambour), on remarque que les sujets n'ont pas du tout apprécié les sons dont le bruit de tambour a été atténué. Les sujets ont préféré le son original sans filtrage.

L'interaction entre G1 et G2 permet des explications complémentaires. On remarque que l'effet de G1 lorsque G2 est au niveau -1 (résonance atténuée) est décroissant (courbe noire). Le niveau du bruit du moteur (sifflements) dégrade l'acceptabilité lorsque le bruit du tambour est atténué ( $G2 = -1$ ). Ce résultat est conforme l'intuition : en l'absence du bruit de résonance du tambour ( $G2 = -1$ ), plus les sifflements aigus sont présents, plus l'acceptabilité est faible.

Lorsque le son de résonance a été amplifié ( $G2 = +1$ ), on observe une inversion de la tendance de l'effet de G1 (courbe bleue). Plus les sifflements sont présents, plus l'acceptabilité augmente. Une explication possible est que la présence des sifflements doit rééquilibrer le spectre général, et masquer les claquements basse-fréquence du tambour. Les bruits du tambour et le bruit du moteur présentent un effet de masquage mutuel, sans être appréciés de manière isolée.

Lorsque le son de résonance n'a pas été modifié (courbe bleue) on retrouve la même courbe de tendance que lorsque qu'on observe le facteur F1 seul, l'effet étant très faible.

L'étude du critère Acceptabilité pour le cycle Essorage permet finalement de mettre en évidence un effet d'interaction entre les facteurs G1 et G2. Si on diminue le bruit tambour ( $G2 = -1$ ), il faut également diminuer les sifflements ( $G1 = -1$ ) pour que l'acceptabilité augmente.

#### IV. CONCLUSION

Ce projet a permis de mettre en évidence l'effet de différentes composantes du son sur l'acceptabilité des sons de machines à laver. A partir de cette étude, nous avons vu par exemple que pour le cycle de lavage, le bruit du linge était plutôt agréable aux sujets, aussi il n'est donc pas nécessaire de chercher à retirer cette composante du son de la machine à laver. Cette dernière permet en effet de masquer le bruit du moteur qui reste le plus gênant dans cette phase de lavage. Nous avons pensé qu'harmoniser le son du moteur durant le lavage (par exemple en mettant en place une solution de

contrôle actif dans la machine à laver pour harmoniser le son) pouvait augmenter l'acceptabilité. Les tests montrent que ce processus n'a pas une influence positive sur l'acceptabilité du son. Une autre piste d'amélioration serait d'harmoniser le son du moteur en n'ajoutant que quelques composantes harmoniques à la fondamentale du moteur (tierce et quinte). Concernant le son d'essorage, les résultats montrent que des interactions peuvent survenir entre les composantes du son. Diminuer le niveau sonore de certaines composantes n'est donc pas forcément un gage d'augmentation de l'acceptabilité. En outre, nous avons implémenté une série de descripteurs physiques calculés sur les deux banques sonores (puissance par bande, centre de gravité spectral, sonie, rugosité). Ils permettent d'expliquer en détail l'acceptabilité et d'orienter les concepteurs vers des solutions constructives pour améliorer les sons des machines.

#### V. REMERCIEMENTS

Remerciements au personnel de S20 Industries (La Roche sur Yon) pour leur contribution au projet.

#### VI. REFERENCES

- [1] Van Egmond R. The experience of productsounds. In *Product experience*, 1<sup>st</sup> Edition, Hendrik N. J. Schifferstein & Paul Eckert editors, Elsevier Science, 2008.
- [2] Lyon R. H. Product soundQuality – from perception to design. *Sound and Vibration*, March 2003.
- [3] Bowen D. L., Carow J.P. Use of consumer listening panels to enhancesoundquality. *Appliance Engineer*, May 2001.
- [4] Yanagisawa H., Yokoo S., & Murakami T. (2011). Effect of tonal harmonicfeature in product noise on emotionalquality, *ImprovingComplexSystemsToday*, D. D. Frey et al. (eds.) *Advanced Concurrent Engineering*, DOI: 10.1007/ 978-0-85729-799-0\_55, Springer-Verlag London.