

## CFA/VISHNO 2016

**Suivi de production par analyse acoustique et algorithme de séparation de composantes sonores**

S. Molla<sup>a</sup>, P. Mollon<sup>b</sup>, G. Stempfel<sup>a</sup>, H. Lachambre<sup>a</sup> et P. Boussard<sup>c</sup>

<sup>a</sup>GENESIS, Bât. G. Mégie, Domaine du Petit Arbois BP 69, 13545 Aix-En-Provence Cedex 4, France

<sup>b</sup>VALEO EEM, 10 rue du Revolay, Parc d'activités de Chesnes BP 71, 38271 Saint Quentin Fallavier Cedex, France

<sup>c</sup>GENESIS, Domaine du Petit Arbois BP69, 13545 Aix En Provence Cedex 04, France  
patrick.boussard@genesis.fr



LE MANS

L'analyse de composantes harmoniques, la détection de clics ou de chocs, etc. sont des tâches auxquelles un acousticien est régulièrement confronté, et ce dans des domaines très variés (troubleshooting, design sonore, maintenance conditionnelle, ...). La décomposition d'un signal complexe en plusieurs signaux plus simples est une opération qui peut souvent faciliter la tâche de l'analyste. GENESIS a proposé une suite d'algorithmes qui permettent la décomposition d'un signal acoustique en plusieurs composantes : bruit stationnaire, partie tonale, partie transitoire, partie restante. Ce développement est basé sur la mise en œuvre de méthodes de débruitage, de suivi de composantes tonales et de détection de transitoires inspirées de l'état de l'art dans ces domaines. Pour une utilisation optimale, GENESIS a proposé un appel séquentiel de ces opérations, et intégré ce choix dans une procédure de mise au point la plus simple pour l'utilisateur final. Les démarreurs pour automobile sont principalement composés d'un moteur électrique à courant continu, d'un réducteur et d'un système de crabotage d'un pignon sur la couronne du moteur thermique. Parmi les bruits générés lors de leur fonctionnement peut apparaître un sifflement dont les composantes hautes fréquences sont perçues de manière désagréable. Les fréquences responsables de ces sifflements ne sont pas facilement identifiables du fait de la variabilité des vitesses de rotation et des fluctuations des réponses structurales des éléments assemblés par serrage. Dans le cadre d'un suivi de sa production, VALEO souhaitait avoir un moyen de détecter et de quantifier ces sifflements par une méthode la moins intrusive possible. Une solution a été trouvée en utilisant un algorithme de séparation automatique de composantes tonales et de leurs niveaux relatifs au niveau du bruit de fond. On peut alors obtenir un critère d'acceptation qui ne dépend pas de fréquences ou d'ordres fixes mais d'un critère de perception de ce désagrément.

## 1 Introduction

Les démarreurs d'automobiles sont des machines tournantes, composées essentiellement d'un moteur électrique à courant continu et d'un système de crabotage d'un pignon dans la couronne du moteur. Ils permettent au moteur thermique d'atteindre la vitesse minimum qui l'autorise à prendre son autonomie en rotation. Si bien souvent on peut se réjouir d'entendre le son du démarreur, cette phase de démarrage peut parfois s'avérer pénible. C'est notamment le cas lors de l'utilisation des systèmes de redémarrage automatique (ou « stop-start »), qui augmente significativement la fréquence de cette opération.

Les sources acoustiques à l'origine du bruit de démarreur sont essentiellement des harmoniques de la fréquence de rotation de l'induit. Elles peuvent avoir des origines mécaniques (frottement balais/collecteur, engrenements...) ou électromagnétiques (sifflements).

Or, la gêne qui en résulte peut être générée par n'importe quelle harmonique de la rotation de l'induit s'appropriant un mode rayonnant de la structure. Comme le démarreur est une machine dont la vitesse varie constamment (passage des compressions, phase d'arrêt de l'induit dite « lâcher de clef », etc.) l'analyse d'ordre classique basée sur le RPM (régime de rotation) n'est pas satisfaisante. D'autant moins que cette méthode est « intrusive » de par la nécessité d'équiper le démarreur d'un top tour (capteur de vitesse).

Dans cet article, nous nous focalisons sur la problématique du bruit des démarreurs au moment du lâcher de clef : la présence de sifflements qui peuvent être perçus de manière désagréable par le client, voire rejetés car non acceptables, est ici étudiée.

GENESIS a proposé des algorithmes de séparation semi-automatique de composantes des signaux. Dans le cadre de cette étude, VALEO a testé différentes méthodes de séparation et différentes combinaisons pour obtenir un indicateur efficace et fiable de l'acceptabilité du désagrément produit par le bruit des démarreurs.

Ainsi, ces algorithmes intégrés dans le logiciel LEA de GENESIS, qui permettent de décomposer un signal en plusieurs composantes, seront décrits.

A l'aide de ces traitements, une méthodologie de recherche de l'indicateur est exposée. Enfin, la phase de

mise au point des paramètres est détaillée, et l'indicateur retenu est décrit et validé sur des sons réels.

## 2 Problématique

### 2.1 Principe du démarreur

Lorsque l'ordre de démarrage est donné, le contacteur permet l'avance du pignon dans la couronne et le contact de puissance pour alimenter le moteur électrique. Le démarreur entraîne alors le moteur thermique soit directement, soit via un réducteur. Une fois le moteur thermique autonome, le contacteur est coupé, le pignon se désengage et l'induit du démarreur s'arrête sur son inertie.

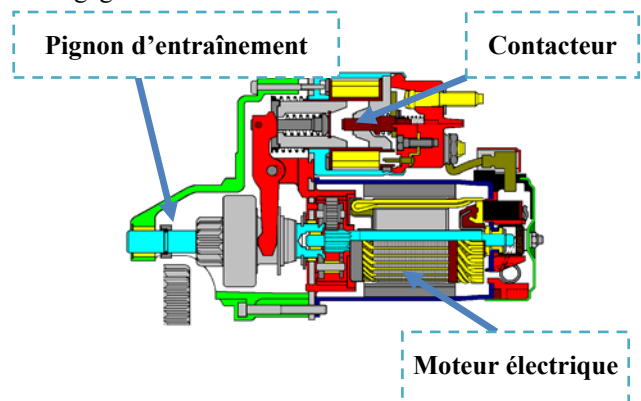


Figure 1: principe général du démarreur

### 2.2 Bruit généré

Les bruits générés lors d'un démarrage sont liés au fonctionnement des engrenements (pignon/couronne essentiellement, quelquefois le réducteur) et du moteur électrique (mécanique et électromagnétique).

Cependant, ces bruits peuvent varier en fonction des conditions d'utilisation du démarreur : si le but final est d'avoir un démarreur non bruyant sur un véhicule, les contrôles qualité peuvent nécessiter des mesures sur banc, ou poste « à vide », c'est-à-dire démarreur seul uniquement alimenté. C'est notamment le cas en fin de chaîne de production.

On comprend bien que pour certaines phases (par exemple à l'entraînement) les bruits générés seront

différents. Mais pour d'autres, et plus particulièrement le lâcher de clef, le comportement reste le même.

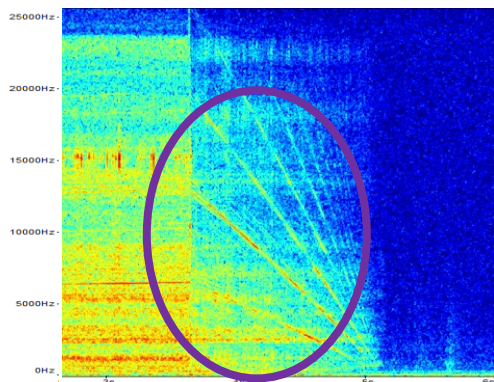


Figure 2: spectrogramme d'un enregistrement du bruit d'un démarreur au moment du lâcher de clef

Typiquement, ce bruit est composé d'harmoniques de la fréquence de rotation de l'induit, amplifiées ça et là (entre 10 kHz et une centaine de Hz) par des phénomènes de résonance. La gêne est ainsi produite à un moment par certaines harmoniques et plus tard par d'autres, et ce jusqu'à l'arrêt complet de l'induit.

La quantification des bruits gênants par une analyse de type ordres demanderait la surveillance d'un très grand nombre d'ordres, et nécessiterait d'intégrer un capteur spécifique. Une approche plus perceptive a été proposée par GENESIS, et mise à l'épreuve par VALEO sur ce type de bruit.

### 3 Algorithmes de décomposition

Le Logiciel d'Expertise Acoustique (LEA<sup>1</sup>) de GENESIS intègre une suite d'algorithmes d'aide à la décomposition des signaux acoustiques et vibratoires. Ce groupe de traitement de signaux, nommé XTRACT, a été présenté dans un article de 2014 [1].

Ainsi, un signal peut être décomposé en différentes composantes (de une à quatre) parmi les suivantes :

**bruit (N)** : l'algorithme de débruitage est basé sur les travaux de [3], qui proposent de traiter le signal directement à partir de sa représentation de Fourier à court terme. Ce débruitage s'effectue par rapport à un spectre de bruit *a priori*. Une étape de post-traitement destinée à éviter les bruits musicaux dans le signal débruité est ensuite opérée, étape qui prend en compte le voisinage temporel et fréquentiel de chaque coefficient d'intérêt. Une procédure automatique d'estimation de bruit a été intégrée, pour pallier le cas où aucun échantillon ou profil spectral du bruit à supprimer n'est disponible. Cette procédure, basée sur [4], repose sur l'analyse de la répartition des amplitudes pour chaque voie fréquentielle de la représentation.

**tonales (T<sub>O</sub>)** : la partie tonale du signal est définie comme la composante qui contient tous les éléments assimilables à des sinusoïdes évoluant dans le temps, à la fois en amplitude et en fréquence (autrement dit, un ensemble des composantes localisées en fréquence). Aucune hypothèse d'harmonicité ou de relation entre ces

« raies » n'est faite. La détection des tonales au sein du signal est effectuée à partir d'une méthode de suivi de fréquences inspirée de [2]. A partir d'une transformée de Fourier à court terme du signal, les maxima des spectres d'amplitudes de fenêtres consécutives sont regroupées en chemins sur des critères de proximité en fréquence et en amplitude. A partir des travaux de [2], la prédiction de la fréquence à l'instant suivant (fenêtre temporelle suivante) est effectuée. Une fois les chemins identifiés, les tonales sont extraites du signal après estimation de leur énergie instantanée ; cette estimation est basée sur le voisinage temps-fréquence de chaque élément du chemin. Cette opération permet de ne pas retirer d'énergie superflue du signal lors de l'extraction des tonales, que celles-ci cohabitent avec des transitoires ou avec du bruit.

**transitoires (T<sub>R</sub>)** : la partie transitoire du signal regroupe toutes les composantes qui sont à la fois localisées en temps, d'énergie non négligeable, et à large bande fréquentielle. Cela regroupe typiquement les sons de type impact ou choc. Pour identifier et isoler (ou extraire) ces composantes, la résolution d'un problème inverse avec des contraintes de parcimonie de la représentation temps-fréquence du signal a été choisie, dérivée de l'algorithme LASSO [5]. Afin de renforcer la parcimonie de la représentation et de tirer profit de la structure particulière des transitoires, une régularisation par norme mixte est choisie, et deux bases de décomposition sont utilisées : l'une adaptée à la représentation des éléments localisés en temps, l'autre adaptée aux éléments localisés en fréquence. L'algorithme ainsi créé est inspiré des travaux de [6].

**restant (Rem)** : la partie restante correspond à toute composante ou partie de signal qui n'a pas été classée dans les typologies précédentes, et donc non extraite par les algorithmes. Elle est obtenue par simple soustraction.

L'intérêt de cette méthode est de pouvoir chaîner plusieurs algorithmes automatiquement. Un ordre prédéfini a été établi, à partir de tests de performances non exhaustifs, partant du constat que certains traitements améliorent les résultats de traitements suivants s'ils sont effectués auparavant. Il est important de noter que la suite complète des traitements conserve l'information originelle contenue dans le signal, au sens où la somme des composantes extraites permet de retrouver exactement le signal en entrée (voir Figure 3).

<sup>1</sup> [www.genesis-acoustics.com](http://www.genesis-acoustics.com)



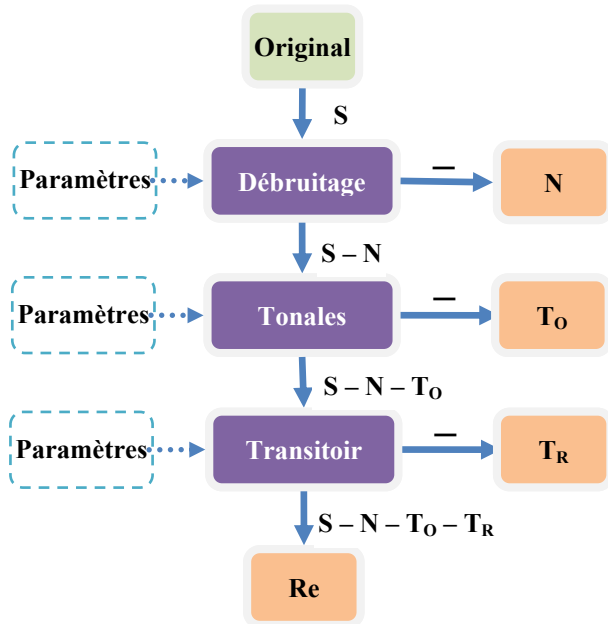


Figure 3: schéma synthétique de la procédure XTRACT de séparation des signaux en plusieurs composantes

Dans cette étude, une attention particulière a été apportée à l'utilisation de la partie de détection et d'extraction de tonales. En effet, c'est la séparation du signal original en deux composantes, *tonales* et *restant*, qui est naturellement la plus appropriée. L'utilisation de ce traitement est détaillée dans son contexte dans la section suivante.

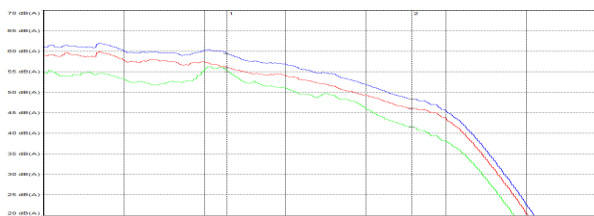
## 4 Méthodologie

### 4.1 Identification de l'indicateur

Un bruit peut être jugé désagréable à partir du moment où certaines fréquences « émergent » du bruit de fond. Cette notion d'émergence est ici considérée entre le niveau des « Tonales » et celui du « Bruit de fond ».

Ainsi, si le niveau de « Tonales » dépasse celui de « Bruit de fond » d'une quantité donnée (en dB), alors « Tonales » sera jugée comme gênante. La Figure 4 propose une illustration du concept décrit ci-dessus.

Exemple de courbes dites « acceptables » :



Exemple de courbes dites « gênantes » :

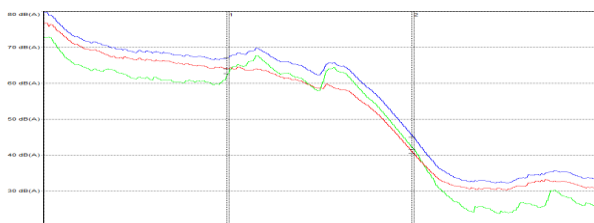


Figure 4: niveaux en dBA des différentes composantes, en fonction du temps. De haut en bas : Original (bleu), Restant (rouge), Tonales (vert).

### 4.2 Réglage des paramètres

Les paramètres de réglage de la détection des tonales résident essentiellement dans le niveau de l'émergence, la durée de persistance de cette émergence dans le temps et la pente de variation des fréquences dans le temps.

Un critère d'acceptabilité, basé sur la gêne quantifiée, nécessite une bonne corrélation entre le niveau d'émergence acceptable mesuré sur véhicule et celui mesuré sur le banc de contrôle. Pour étudier cette corrélation, les démarreurs sont successivement évalués sur banc puis sur véhicule. Chacune de ces mesures est jugée objectivement et subjectivement, jusqu'à ce que le ou les paramètres de ce traitement ségréatif soient satisfaisants (filtre de séparation des composantes).

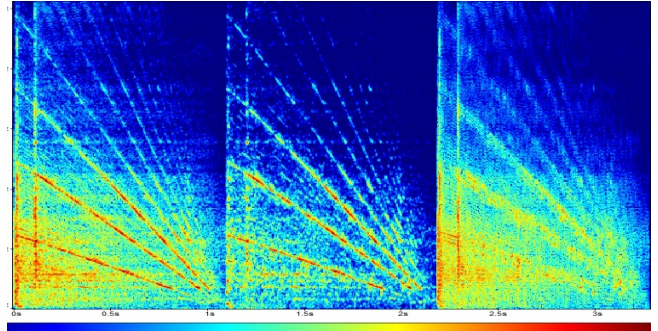


Figure 5: représentation temps-fréquence des signaux issus de la décomposition : (g) original, (m) tonales, (d) restant

### 4.3 Intégration sur banc de production

L'intégration en production de ce traitement dit de « filtrage tonal » s'est effectuée par l'ajout d'une bibliothèque spécifique dans un logiciel de contrôle en fin de ligne déjà existant. Ainsi, chaque démarreur produit passe en jugement systématique en condition de bruit de fonctionnement à vide, puis en condition de bruit de « lâcher de clef ».

## 5 Validation

VALEO a optimisé le réglage des paramètres de façon à avoir une bonne corrélation entre l'impression perçue sur véhicule et la mesure sur banc. Des productions spécifiques en termes de variabilité ont été passées au travers du filtre, suivis d'essais *in situ*.

A l'heure actuelle des réglages sont toujours en cours, notamment en ce qui concerne la définition des conditions de mesure. En effet, celles-ci peuvent être variables du fait du bruit de fond en milieu industriel (bruit de la ligne, transitoires, chocs aléatoires...).

Les essais hors-ligne de type labo ont quant à eux donné satisfaction.

## 6 Conclusion

VALEO a réussi à mettre au point un indicateur de quantification du désagrément perçu dans le bruit généré lors du lâcher de clef d'un démarreur. Cet indicateur a été développé à partir des travaux précédents de GENESIS sur la séparation de composantes des signaux.

Un développement est en cours chez GENESIS afin de procéder à l'intégration de cet indicateur en fin de chaîne de production pour un test systématique de qualité acoustique. L'acceptabilité du démarreur sera alors immédiatement évaluée sur le banc de production.

VALEO quantifie la variabilité de l'indicateur relativement aux conditions de la mesure. L'étape suivante sera l'optimisation du traitement et/ou du réglage pour s'affranchir au mieux de l'influence de l'environnement de test (relativement au bruit de fond).

## Références

- [1] H. Lachambre *et al*, Automatic denoising and components separation: Tonal, Noise, Transient, *Proc. of XIX<sup>th</sup> Symposium VISHNO* (2014).
- [2] M. Lagrange, S. Marchand, J.-B. Rault, Enhancing the Tracking of Partial for the Sinusoidal Modeling of Polyphonic Sounds, *IEEE Trans. On Audio Speech and Language Processing*, vol. **15**, no. **5**, 1625-1634 (2007).
- [3] G. Yu, S. Mallat, E. Bacry, Audio Denoising by Time-Frequency Block Thresholding, *IEEE Trans. On Signal Processing*, vol. **56**, no. **5**, 1830-1839 (2008).
- [4] A. R. Fukane, S.L. Sahare, Noise Estimation Algorithms for Speech Enhancement in highly non-stationary Environments, *Int. Journal of Computer Science Issues*, vol. **8**, no. **2**, 39-44 (2011).
- [5] R. Tibshirani, Regression shrinkage and selection via the lasso, *Journal of the Royal Statistic Society, Serie B* **58(1)**, 267-288 (1996).
- [6] M. Kowalski, Approximation des signaux: approches variationnelles et modèles aléatoires, *PhD Thesis Université de Provence - Aix-Marseille I* (2008).