

Détection du bruit dans un signal sonore, transformée en ondelettes discrète

Le sujet choisi combine algorithmique, analyse numérique, et rudiments d'algèbre linéaire : l'opportunité que représente la théorie des ondelettes, qui propose une solution originale pour détecter le bruit, m'a séduit. Mon utilisation personnelle d'écouteurs utilisant la réduction active du bruit m'a également encouragé à en apprendre davantage sur l'analyse du signal.

La détection du bruit intervient dans les systèmes auditifs utilisant le principe de contrôle actif des nuisances sonores (ANC, Active Noise Control). L'ANC est un moyen très efficace de réduire les nuisances, et est utilisé pour certaines fenêtres d'appartement et habitacles de voitures, limitant "localement" les nuisances du trafic routier.

Positionnement thématique (ÉTAPE 2) :

- *INFORMATIQUE (Informatique pratique)*
- *MATHEMATIQUES (Mathématiques Appliquées)*
- *MATHEMATIQUES (Algèbre)*

Mots-clés (ÉTAPE 1) :

Mots-clés (en français)	Mots-clés (en anglais)
<i>Ondelette</i>	<i>Wavelet</i>
<i>Débruitage</i>	<i>Denoising</i>
<i>Seuillage</i>	<i>Thresholding</i>
<i>Bruit blanc gaussien</i>	<i>White Gaussian noise</i>
<i>Transformée discrète en ondelettes</i>	<i>Discrete wavelet transform (DWT)</i>

Bibliographie commentée

Depuis une trentaine d'années, l'utilisation d'interférences pour atténuer un son est devenue un domaine majeur de la recherche en acoustique. Ces interférences, observables lorsque deux sources émettent un son, donnent lieu à un nouveau signal, d'amplitude parfois plus forte, mais aussi plus faible (interférences constructives, ou destructives). Ce phénomène est une conséquence du principe de superposition : la pression produite par deux ondes en un point vaut la somme des pressions produites par chaque onde individuellement. Ainsi, pour obtenir un son atténué, la variation de pression résultant de l'action des différentes sources doit être diminuée. En conséquence, pour atténuer un signal sinusoïdal, il suffit d'émettre un signal de même pulsation mais ayant un déphasage judicieux avec le signal d'entrée.

Néanmoins, une onde sonore ne se réduit pas à un simple signal sinusoïdal, ni même à un signal périodique. Si l'onde est périodique, une décomposition en séries de Fourier est possible [2]. Une analyse harmonique permet ensuite de retenir les fréquences où les harmoniques sont de plus

grande amplitude et d'émettre pour chacune d'entre elles un signal en opposition de phase : on obtiendrait ainsi une atténuation efficace du son. Toutefois, en ville, les nuisances sonores ne forment que rarement un signal périodique, une telle démarche est donc peu souvent envisageable [2,5]. De plus, le signal reçu par un micro est souvent "bruité" lors de la mesure [6]. Dans un cadre d'étude précis, le bruit peut-être supposé comme étant un bruit blanc gaussien, c'est à dire un signal de puissance uniforme sur la bande de fréquence, et où la répartition se fait autour d'une fréquence centrale : on dit qu'il suit une loi normale.

Lors de la génération d'interférences destructives, il faut donc prendre en compte le bruit. Dans les systèmes auditifs utilisant la réduction active du bruit, la détection du celui-ci est mise en évidence par un microphone d'erreur, qui compare le signal d'entrée avec le signal émis, puis déduit en temps réel le filtrage optimal à mettre en place [6]. Par ailleurs, on peut débruiter numériquement le signal par le biais d'une analyse par ondelettes du signal [1,2].

L'analyse par ondelettes s'applique dans différents domaines comme la spectroscopie, la sismologie, l'imagerie numérique ou l'acoustique. Les ondelettes sont des fonctions réelles de moyenne nulle, pour lesquelles l'intervalle où la fonction ne s'annule pas (son support) est fini [1,2,4]. Les familles d'ondelettes étant nombreuses, il est possible d'obtenir des analyses différentes pour un même signal : cette richesse implique que certaines familles auront des utilisations plus adaptées dans certains domaines que d'autres [3]. Chacune de ces familles d'ondelettes résultent d'une ondelette mère, les autres ondelettes sont obtenues par translation (fenêtrage) et homothétie. Par exemple, l'ondelette de Morlet, établies en 1975, est la fonction : $t \cos(5t) \exp(-t^2/2)$. Il existe des ondelettes plus simples, avec moins de moments nuls, comme celles de Haar, établies en 1909 et ayant pour ondelette mère la fonction pour laquelle t prend comme valeur 1 sur $[0, 1/2[$, -1 sur $[1/2, 1[$ et qui s'annule pour toutes autres valeurs réelles [1,2,3,4].

Une des méthodes de filtrage du signal est l'algorithme de seuillage par ondelettes de Donoho et Johnstone [1,2]. Après avoir réalisé la transformée en ondelettes du signal, l'algorithme sélectionne les coefficients les plus significatifs : les coefficients de chaque ondelette sont comparés avec une valeur seuil T , proportionnel à la variance du bruit, puis ils sont « seuillés » (c'est-à-dire multipliés par la valeur 1 ou 0) afin de ne conserver que les valeurs plus grandes que T [1,2].

Problématique retenue

Il s'agit de discuter de l'utilisation des ondelettes pour le débruitage d'un signal audio. On mettra en évidence l'importance du choix de la famille d'ondelettes pour un tel procédé, et on proposera un cadre pour lequel l'hypothèse du bruit blanc gaussien est raisonnable.

Objectifs du TIPE du candidat

Je me propose d'étudier l'algorithme de transformée en ondelettes et d'utiliser ces fonctions d'ondes afin de débruiter un signal audio. On implémentera en Python l'algorithme de seuillage de Donoho et Johnstone, dans le cas particulier des ondelettes de Haar, que l'on testera sur des enregistrements audio de plus ou moins bonne qualité. L'objectif sera de comparer les résultats avec ceux que l'on aurait obtenus pour des familles d'ondelettes différentes.

Références bibliographiques (ÉTAPE 1)

- [1] STÉPHANE MALLAT : A Wavelet Tour of Signal Processing, The Sparse Way : 3rd Edition (2008)
- [2] CATHERINE CHARLES : Introduction aux applications des ondelettes : Unité de Statistique, Informatique et Mathématiques Appliquées (SIMa), Gembloux, Belgique. (2011)
- [3] STÉPHANE MALLAT : Bases Orthogonales d'Ondelettes : Notes des Cours de Stéphane Mallat, Représentations Parcimonieuses, Cours 2021 n°7, Paris, Collège de France.
<https://www.di.ens.fr/~mallat/College/WaveletTourChap7.pdf>
- [4] YVES MEYER, STÉPHANE JAFFARD ET OLIVIER RIOUL : L'Analyse par ondelettes : Pour la Science (1987)
- [5] CYRIL PLAPOUS : Traitements pour la réduction de bruit. Application à la communication parlée : Traitement du signal et de l'image. Université Rennes 1, (2005)
- [6] RENÉ LE, PIERRE LALIBERTÉ : Conception d'un protecteur auditif à suppression de bruits dominants : Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail, Rapport R-361, Québec, (2004)

DOT

- [1] : Début Juillet 2022 : Familiarisation avec la théorie des ondelettes, découverte de l'algorithme de Donoho et Johnstone (références [2] et [4]).
- [2] : Août 2022 : Lecture de la référence [1] et compréhension des concepts clés.
- [3] : Septembre 2022 : Début de la programmation python des outils du TIPE, utilisation de la bibliothèque PyWavelets.
- [4] : Novembre 2022 : Réalisation de tests et mesures, dont les résultats sont éronnés.
- [5] : Décision Fin Décembre 2022 : Arrêt du recours à la bibliothèque PyWavelets, jugée inadaptée pour le traitement de signaux sonores.
- [6] : Fin Février 2023 : Passage d'une version naïve à une stratégie de programmation dynamique dans la transformée discrète en ondelettes.
- [7] : Mars 2023 : Réalisation de tests et mesures, dont les résultats sont convaincants.
- [8] : Mai 2023 : Vérification des hypothèses faites sur le bruit éliminé lors du seuillage. Test de normalité : résultats valides après une rapide correction.