

1 LAENNEXT® : ASPECTS TECHNIQUES

Résumé

L'obstruction des voies respiratoires par des glaires provoque l'apparition de bruits spécifiques lors de la respiration, ces bruits sont détectables par un médecin utilisant un stéthoscope.

Le principe de la technologie Laennext® consiste à transformer l'information sonore en information visuelle facilement interprétable. Jusqu'alors toutes les tentatives existantes consistent à visualiser le signal sonore sous la forme amplitude-temps, le signal sonore étant capté par l'intermédiaire d'un microphone amplifié du type stéthoscope électronique. On trouve aussi des systèmes faisant appel à une transformation de type Fourier qui ne nous fournit qu'une valeur moyenne de la composition spectrale du bruit respiratoire et qui ne peut mettre en évidence les phénomènes brefs

Laennext® fait appel à un traitement temps-fréquence du type spectrogramme. Les avantages de cette méthode par rapport à celles existantes sont :

- Grande lisibilité de la visualisation
- Reproductibilité totale de l'analyse
- Stockage aisé de l'information
- Grand pouvoir de séparation temporel des phénomènes brefs

2 ANALYSE DES BRUITS RESPIRATOIRES

Historiquement l'analyse des bruits respiratoires a été développée par le docteur René Théophile Laennec avec l'invention du stéthoscope en 1816. Cependant cet appareil n'est en fait qu'un capteur, il n'est pas à proprement parler un instrument d'analyse. Aujourd'hui, l'utilisation du stéthoscope s'est considérablement réduite du fait de la nature trop subjective de l'analyse. En effet les sons sont plus faciles à entendre qu'à décrire.

On distingue deux grandes catégories de bruits dans le cadre de l'auscultation pulmonaire :

- Les bruits respiratoires normaux.
- Les bruits respiratoires bronchiques.

2.1 Les bruits respiratoires bronchiques (les râles) peuvent, à leur tour, être classés en deux grandes catégories :

- **Les craquements** (regroupe tous les bruits adventices discontinus. La durée de ces bruits ne dépasse pas 20 ms).
- **Les sibilances** (bruits continus d'une durée supérieure ou égale à 125 ms). Les sibilances sont elles même subdivisées en deux classes suivant qu'elles sont formées de une ou plusieurs fréquences les mono-phoniques et les poly-phoniques.

Dans l'analyse traditionnelle des bruits pulmonaires, le médecin doit prendre en compte cinq paramètres essentiels :

- **La fréquence hertzienne.** Les médecins qualifient les sons selon trois catégories ; basse, moyenne ou haute fréquence.
- **La situation dans la phase du cycle respiratoire.** Les phases inspiratoire et expiratoire sont subdivisées en proto - (premier tiers de la phase), méso - (tiers médian de la phase) - téléphase (troisième tiers de la phase).
- **La position-dépendance.** L'écoute des craquements peut dans certains cas être influencé par les positions du corps.
- **La kinésie-dépendance.** Les craquements sont susceptibles de varier en fonction de manœuvres respiratoires.
- **Le nombre de craquements.** Il témoigne de l'importance de l'atteinte et peut être évalué de manière approximative au stéthoscope.

Pour les médecins, il est difficile voir impossible de mémoriser les auscultations successives de plusieurs malades, avant et après traitement, à fortiori de les comparer à plusieurs heures ou plusieurs jours de distance. Pour palier cette grave lacune, un codage associé à une cartographie des voies respiratoires et poumons est disponible. Cependant le vocabulaire est évidemment restreint et subjectif.

3 AVANT LAENNEXT®

3.1 Avant le développement par PneumoPartners du logiciel Laennext® les possibilités d'analyse du bruit auscultatoire étaient plutôt limitées. Nous trouvons sur le marché uniquement deux approches :

3.2 L'analyse temporelle

Contrairement au stéthoscope traditionnel, le stéthoscope électronique incorpore un microphone qui permet de récupérer l'information sonore sous la forme d'un signal électrique. Il est alors possible à l'aide d'un oscilloscope de visualiser l'évolution temporelle de l'amplitude du son. A l'aide d'un système numérique, il est aussi possible de mémoriser le signal afin de l'observer plus finement.

Cependant ce type de traitement s'avère très limité quant aux possibilités d'interprétation. En effet, un signal d'amplitude ne fait en aucun cas de distinction entre le signal utile et le bruit. De plus un signal bref ou périodique n'est aucunement mis en évidence. A la rigueur une impulsion de forte amplitude peut être observable mais elle ne sera pas quantifiable.

3.3 L'analyse spectrale

A partir du signal temporel, il est possible d'effectuer une analyse spectrale qui permet de mettre en évidence les caractéristiques fréquentielles du signal. L'outil d'analyse nécessaire à ce type d'étude est la transformation de Fourier (dont l'application informatique se nomme FFT : Fast Fourier Transform). Cependant ce type d'approche n'est que peu adaptée à une analyse des phénomènes brefs. En effet une analyse spectrale permet de mettre en évidence le caractère périodique d'un signal dans la mesure ou celui ci est prédominant. En fait, un son se distinguera s'il est présent sur une durée importante. Dans le cas contraire, il sera masqué par le reste du signal qui dégradera la lisibilité. En conséquence les phénomènes de type « impulsionnel » sont totalement indécélables.

A la suite de ces remarques et des mesures effectuées en milieu hospitalier (conditions réelles), on arrive donc à la conclusion suivante :

L'analyse de type Fourier (FFT) ne peut être suffisante pour caractériser tous les types de bruits adventices. Dans une certaine mesure, ce type d'approche permet éventuellement de caractériser des sibilances très marquées mais en aucun cas des craquements.

4 LA SOLUTION LAENNEXT® : L'ANALYSE TEMPS-FREQUENCE

Ces méthodes de traitement du signal permettent de mettre en évidence à la fois les caractéristiques fréquentielles et temporelles des signaux. Il est notamment possible d'utiliser des représentations graphiques symboliques visualisant l'évolution temporelle de la répartition spectrale d'un phénomène.

On imagine facilement que ce type de visualisation se prête particulièrement bien à un archivage des caractéristiques des bruits respiratoires. Il est notamment possible de mettre en évidence les phénomènes de type craquement en nombre, amplitude, fréquence et évolution spectrale. Il est alors possible d'établir une "cartographie" précise des bruits adventices. Ce type d'approche permet dans un premier temps une analyse extrêmement fine puis dans un second temps, une mise en évidence de l'évolution temporelle (d'une consultation sur l'autre) des bruits adventices.

4.1.1 Echantillonnage du signal

Selon le théorème de Shannon, pour éviter les phénomènes de repliement, il est nécessaire d'utiliser une fréquence d'échantillonnage supérieure à deux fois la fréquence maximale du signal utile.

4.1.2 Transformation de Fourier à court terme – Spectrogramme

L'hypothèse de base de ce type d'analyse est que le signal est stationnaire sur la fenêtre d'analyse à court terme. Les résolutions temporelle et fréquentielle sont antagonistes.

La formulation discrète de cette transformation est la suivante :

$$\text{TFCT}_x [n, \nu] = \sum_{k = -nh/2}^{k = nh/2} h[k].x[n+k].e^{-2i\pi\nu k}$$

Cette transformation étant complexe, il est possible de représenter :

- Son module
- Son module au carré (Spectrogramme)
- Sa phase

Les limitations théoriques de ce type d'analyse sont en théorie :

- une localisation peu précise dans le plan amplitude fréquence,
- un manque d'adaptation face aux signaux comportant des composantes fréquentielles très rapprochées ou à évolution rapide.

4.1.3 Autres transformations temps-fréquence

4.1.3.1 **Pseudo Wigner-Ville.** Cette transformation est plus adaptée aux signaux contenant des sauts ou variations de fréquence rapides, ayant un bon rapport signal/bruit et possédant un nombre réduit de composantes fréquentielles.

La formulation discrète de cette transformation est la suivante :

$$\text{PWV}_x [n, \nu] = 2. \sum_{k = -\infty}^{+\infty} |h[k]|^2 . x[m+k].x^*[m-k].e^{-4i\pi\nu k}$$

Dans le but de réduire les interférences générées par la transformation de Wigner-Ville et d'effectuer des lissages indépendants en temps et en fréquence, on peut utiliser aussi un modèle dit « lissé ».

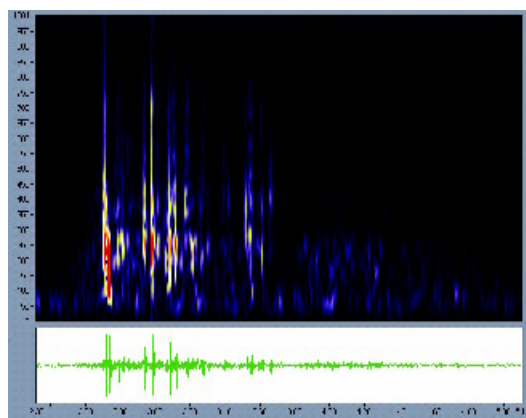
4.1.3.2 **Pseudo Choi-Williams masquée, Zhao-Atlas-Marks, pseudo Born-Jordan.** Elles permettent de réduire les termes d'interférence de la distribution de Wigner-Ville tout en préservant les distributions marginales temporelle et fréquentielle.

4.1.4 **Transformation en Ondelette de Morlet.** L'ondelette de Morlet correspond à une sinusoïde pondérée par une gaussienne. Son utilisation est particulièrement bien adaptée à des signaux large bande comportant à la fois de très hautes et très basse fréquences.

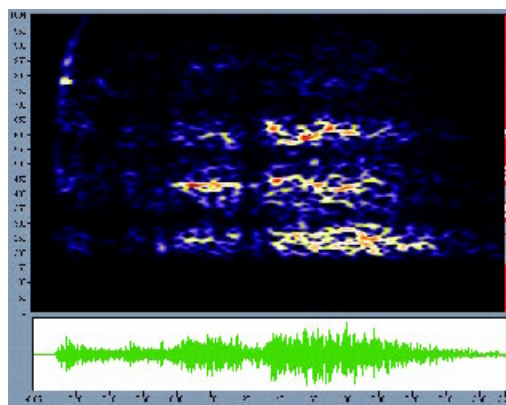
4.2 Validation de l'approche LAENNEXT®

Lors d'une première campagne de mesure, il a été possible de valider la pertinence de l'analyse temps-fréquence. L'implémentation a été effectuée suivant les différentes transformées évoquées ci-dessus. A l'usage il s'avère à priori suffisant d'utiliser une transformation de type Spectrogramme.

L'image du son après traitement mathématique prends alors des caractéristiques facilement identifiables :



Représentation graphique d'un son crépitant



Représentation graphique d'un son sifflant

Cette analyse est évidemment stockée en temps réel ce qui permet un post-traitement du type :

- Analyse automatique de l'image pour aide au diagnostique (amélioration des contrastes, détermination des contours, filtrage des bruits parasites)
- Manipulations graphiques (curseurs, zooms, etc..)
- Impression des courbes
- Stockage d'image sur disque
- Comparaison entre différentes courbes afin de suivre l'évolution d'un patient

Dans le cadre d'une automatisation, une variable fondamentale qui ressort de ce type d'analyse est l'évolution d'une séance sur l'autre des bruits caractéristiques de la respiration du patient. A partir d'une exploitation des caractéristiques d'un même patient mis en base de donnée, on fait ressortir l'évolution des sibilantes et des craquements par différence d'analyse d'un jour sur l'autre et par rapport au profil moyen correspondant à l'état habituel du patient en bonne santé pulmonaire. Dans ce cadre l'appareil devient un outil de détection automatique d'une aggravation de la santé respiratoire.