

État de l'art sur les stéthoscopes électroniques en 2015

Emmanuel Andrès^{1,2}, Raymond Gass³, Christian Brandt⁴

¹ CHRU de Strasbourg, clinique médicale B, service de médecine interne, diabète et maladies métaboliques, 1 porte de l'Hôpital, 67091 Strasbourg Cedex, France

² Université de Strasbourg (UdS), Faculté de Médecine, laboratoire de recherche en pédagogie des sciences de la santé, Strasbourg, France
<emmanuel.andres@chru-strasbourg.fr>

³ Chercheur indépendant, membre distingué de l'Académie Technique Alcatel Lucent, Bolsenheim, France

⁴ CHRU de Strasbourg, CIC, service de cardiologie, Strasbourg, France

Depuis l'invention du stéthoscope et la description de la sémiologie auscultatoire par le Docteur Laennec, ces derniers ont peu évolué. Toutefois, des progrès ont été réalisés ces dernières années tant dans le perfectionnement des outils d'écoute, avec la mise à disposition de stéthoscopes électroniques, que dans l'analyse et la description des signaux auscultatoires, faisant espérer un regain d'intérêt pour la sémiologie auscultatoire. Depuis quelques années, la sémiologie auscultatoire et le stéthoscope sont ainsi entrés dans le XXI^e siècle avec la mise au point de stéthoscopes électroniques communicants et parfois « intelligents ». Dans ce cadre, il nous a donc paru intéressant de réaliser un état de l'art cette thématique, avec une analyse des données de la littérature et d'Internet.

Mots clés : stéthoscope, auscultation, stéthoscope électronique, stéthoscope communicant, stéthoscope intelligent

Introduction

Ces dernières années, la médecine a considérablement changé et « l'art médical » a laissé la place à la « médecine factuelle » (ou *evidence-based medicine*), tout comme le diagnostic médical tend à délaisser les données de l'examen clinique au profit de celles issues des examens complémentaires.

Le fait d'examiner un patient, d'utiliser un stéthoscope, apparaît ainsi pour nombre de patients, voire de praticiens, comme dépassé voire obsolète... [1]. Savoir distinguer les sons (bruits) normaux et anormaux (murmure vésiculaire, crépitant, souffle cardiaque...) reste néanmoins capital en pratique du quotidien pour le diagnostic médical !

Depuis l'invention du stéthoscope et la description de la sémiologie auscultatoire par le Docteur

Laennec [2] (figure 1), ces derniers ont peu évolué, alors que des pans entiers de la Médecine faisaient des avancées incroyables (biologie moléculaire, robotique, biothérapies...) [3].

Toutefois, des progrès ont été réalisés ces dernières années tant dans le perfectionnement des outils d'écoute, avec la mise à disposition de stéthoscopes électroniques, que dans l'analyse et la description des signaux auscultatoires, faisant espérer un regain d'intérêt pour la sémiologie auscultatoire [4]. Depuis quelques années, la sémiologie auscultatoire et le stéthoscope sont ainsi entrés dans le XXI^e siècle.

Dans ce cadre, il nous a donc paru intéressant de réaliser un état de l'art sur les systèmes de capture des sons et sur les stéthoscopes électroniques, communicants et parfois « intelligents », actuellement disponibles.

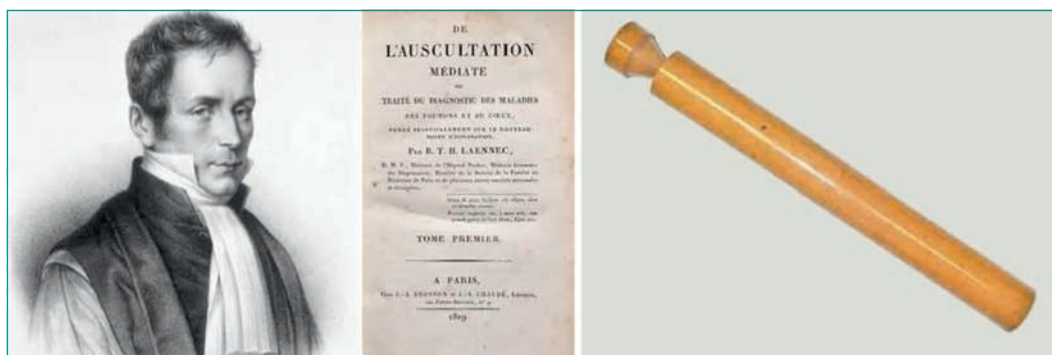


Figure 1. Portrait de René Laennec. *Traité de l'auscultation médiate*, Paris, 1819 [2]. Modèle de stéthoscope analogue à celui proposé par Laennec. C'est un exemplaire de la version originale.

Matériel et méthode

Pour se faire, nous avons réalisé : une recherche bibliographique à travers les bases de données Pubmed et Google Scholar ; une recherche sur Internet à travers le *screening* des sites commerciaux dédiés aux fabricants de stéthoscopes électroniques ; et une recherche sur les brevets déposés ces dernières années (1990-2015) dans le domaine de l'auscultation et des outils auscultatoires (stéthoscopes, logiciels...).

Les mots clés ou expressions suivants ont été utilisés en langue française : « stéthoscope électronique », « stéthoscope communicant », « stéthoscope intelligent », « logiciel d'aide au diagnostic auscultatoire », « logiciel d'analyse du son », « outil d'aide au diagnostic auscultatoire », et « outil d'analyse du son ». Les mots clés expressions anglaises équivalents ont été également utilisés.

Nous avons également, dans un souci d'exhaustivité, présenté nos propres données à travers les différents projets de recherche que nous avons menés dans cette thématique (STETAU – DGE 2004 ; ASAP – ANR Technologie 2006 ; ICARE – Europe 2002 ; PRI – CHRU 2009 ; MARS 500 – CNES 2010), autour d'Alcatel-Lucent, le CHRU, la faculté de Médecine et l'université de Strasbourg [5].

Une description des caractéristiques de chaque système est réalisée, notamment au regard : de la collecte, de l'enregistrement, de la communication avec des ordinateurs (PC...) et/ou autres dispositifs type PDA, smartphone... ; de la présence d'outils d'analyse et de visualisation des signaux auscultatoires ; et du couplage avec d'autres dispositifs (ECG, échographie...).

Les différents systèmes identifiés sont présentés dans la suite du texte par ordre alphabétique selon le nom du fabricant et du dispositif.

Les stéthoscopes de première génération

Adscope

Le stéthoscope électronique Adscope propose une amplification acoustique sans bruits parasites avec 3 modes de fréquence (Cloche [15-200 Hz] : pour les sons cardiaques ; Diaphragme [100-500 Hz] : pour les sons pulmonaires ; et Large Bande [15-4 000 Hz]) et 8 niveaux de volume (*figure 2*) [6]. Il permet une amélioration des caractéristiques de transmission des sons à hautes et basses fréquences, grâce à l'utilisation d'un film piézopolymère breveté sur le microphone. Il est disponible au prix de 180 €.

Andromed [AND I]

En 2002, la société Andromed a mis sur le marché l'Androscope i-stethosMC, un stéthoscope électronique qui permet l'auscultation à distance du cœur et des



Figure 2. Stéthoscope Adscope [6].



Figure 3. Stéthoscope électronique Androscope i-stethosMC et module d'enseignement Androscope [7, 8].

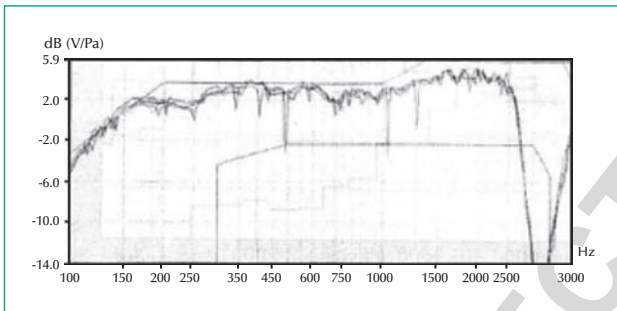


Figure 4. Analyse de la courbe de réponse d'un stéthoscope Androscope i-stethosMC (données de M. R. Gass issues de la nouvelle baie de télé phonométrie d'Alcatel-Lucent à Illkirch, France).

poumons [7]. Ce dernier peut être raccordé au module d'enseignement Androscope pour l'écoute simultanée de sons biologiques (figure 3). Andromed a également développé un capteur complémentaire : Androsonix.

Compatible avec l'Androscope i-stethosMC, le capteur Androsonix permet : la mesure des fonctions pulmonaires et du rythme respiratoire en continu à travers Androflo ; et une estimation de la pression artérielle pulmonaire de façon non-invasive via Androgram. Le module Androlink permet une surveillance en continu de ces différents paramètres et offre ainsi un premier système multiparamétrique de télésanté à domicile [7, 8].

La figure 4 représente la courbe de réponse de l'Androscope i-stethosMC. Elle a été mesurée à l'aide de la baie de mesure de téléphonométrie du Laboratoire d'Alcatel-Lucent à Illkirch (France) (données personnelles de M. R. Gass). Si l'on souhaite restituer les sons de la manière la plus fidèle possible, et si l'on souhaite faire une analyse automatique de signaux (pour l'aide au diagnostic), il est utile d'avoir une courbe de réponse plate dans la plage de fréquence qui nous concerne, à savoir à partir d'une vingtaine de Hz (en-dessous, les micro-

phones sont très onéreux !) pour la fréquence basse. La fréquence haute de 4 000 Hz est un bon compromis, dans la mesure où les signaux que nous avons pu observer ont très peu d'énergie au-delà de 4 kHz, et le fait que les codeurs-décodeurs utilisés en téléphonie ont une fréquence d'échantillonnage de 8 kHz et fabriquent des signaux .wav à 64 kbits/s.

L'analyse de la courbe de réponse de l'Androscope i-stethosMC montre que cette dernière est acceptable [9]. C'est relativement plat entre 150 et 2 500 Hz. C'est bien meilleur et moins aléatoire que le JABES que l'on verra plus loin, mais ça ne semble pas optimal pour un équipement d'analyse automatique.

Biosignetics [BIO]

Les logiciels Biosignetics sont basés sur le logiciel Bsignal qui est capable de lire les signaux acoustiques : sons et vibrations ou toutes autres données dynamiques telles que celles issues de : l'EKG, l'EEG... mais également d'autres signaux biologiques [10].

Ce logiciel est capable de traiter et d'évaluer les caractéristiques de la signature acoustique temps et fréquence [10]. Un outil de type cardio-phonographe permet de visualiser les sons cardiaques, de les enregistrer en temps réel et de les écouter en utilisant le système acoustique de l'ordinateur et des écouteurs (figure 5). Il permet de présenter des sons cardiaques, le niveau du souffle, l'intensité et la hauteur. Ce système semble destiné aux médecins généralistes et étudiants en médecine.

Le système de visualisation de la signature énergétique cardiaque présente la façon la plus complète d'analyser la mécanique énergétique des sons cardiaques, sous forme de cardio-spectrogramme (figure 6) [9]. Cela permet la détection instantanée des anomalies et le détail de la force et de la hauteur des variations pour chaque composante du son et du souffle.

Le système proposé par Biosignetics est un système non invasif conçu pour : la visualisation, la mémorisation, l'écoute et l'impression des données sonores cardiaques (à travers le logiciel Word) [10]. Les logiciels Biosignetics ne sont pour l'instant disponibles que sur PC.

Les sons cardiaques peuvent être enregistrés en temps réel à travers la carte son de l'ordinateur ou une carte son externe. Ils peuvent être annotés (format .txt). Ils peuvent être stockés via un logiciel Excel. Ils sont sauvegardés au format .wav pour une écoute ultérieure et peuvent également, à travers ce format, être échangés pour des avis extérieurs. Ces sons cardiaques ou des segments de ces derniers peuvent être entendus au travers du système audio de l'ordinateur.

Les logiciels Biosignetics permettent surtout une détection et une visualisation de B1, B2, des souffles cardiaques et des marqueurs B3 et B4 [10]. Ils permettent une suppression des bruits parasites.

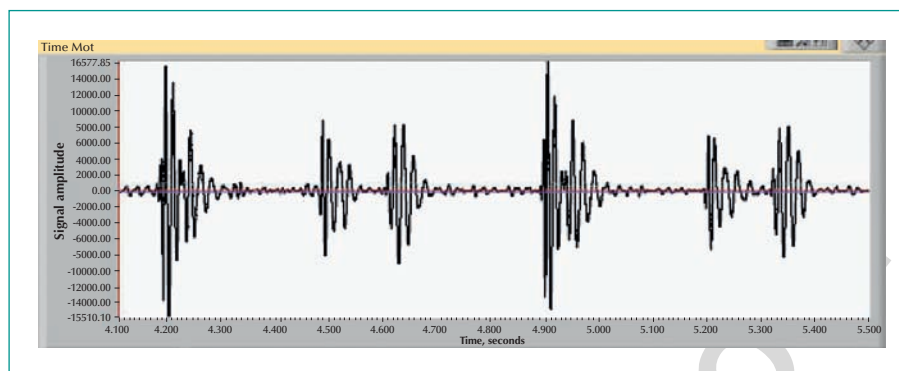


Figure 5. Cardio-phonogramme obtenu à l'aide d'un stéthoscope Welch Allyn et du système Biosignetics. Il permet de visualiser dans le temps les différents sons captés, B1, B2 et souffles cardiaques dans le cadre d'une auscultation cardiaque [10].

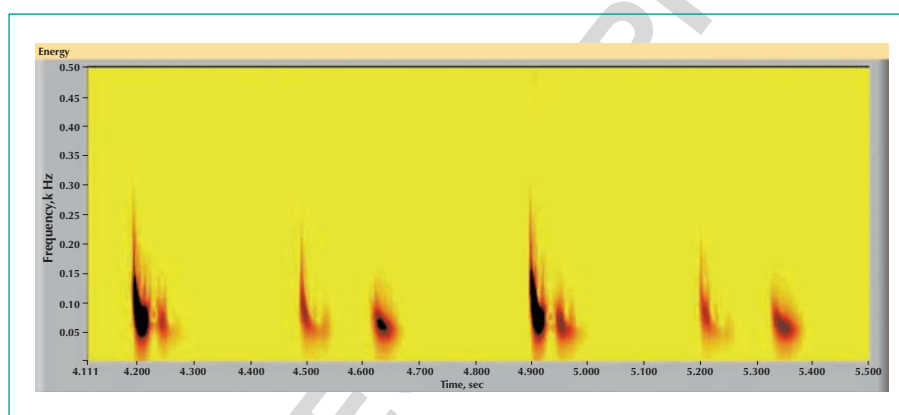


Figure 6. Cardio-spectrogramme obtenu à l'aide d'un stéthoscope Welch Allyn et du système Biosignetics. Il permet de mettre en évidence l'énergie reliée aux différents sons captés, ici B1 et B2 dans le cadre d'une auscultation cardiaque [10].

Les sons cardiaques peuvent être collectés en utilisant un stéthoscope électronique ou des sons cardiaques disponibles dans des bases de données. Ce système a ainsi été testé avec les stéthoscopes suivants : Welch-Allyn (Meditron), ThinkLabsmedical ds32a, Andromed (Philips), Littmann 3M E4000, Cardionics E-scope.

Cardionics [CAR1] [CAR2]

La société Cardionics dispose d'un système d'auscultation avec un stéthoscope électronique, utilisable pour de la télémedecine SimulScope [11].

Le système principal est composé d'un stéthoscope électronique dont les informations sont transmises en infrarouge. La personne désirant écouter les sons utilise un casque infrarouge HeartMan. Le système dispose de 8 filtres qui permettent l'atténuation ou l'augmentation de 8 différentes bandes de fréquences (comme par exemple accentuer le murmure) [11].

Par ailleurs, Cardionics dispose également d'un autre système qui met en plus à disposition des praticiens un ECG.

Mise à jour 2013, le site de Cardionics propose : le stéthoscope E-Scope modèle médical à 335 \$ et un modèle EMS avec casque pour 575 \$ (figure 7) [10]. Ce dernier a été développé pour une utilisation en environnement bruyé, tel que les ambulances et autres véhicules d'intervention.

La notice du stéthoscope développé par Cardionics indique une amplification dans la plage entre 100 et 200 Hz. Nous avons pu constater lors de nos études dans le cadre des projets ICARE, STETAU et ASAP que cette plage était insuffisante pour caractériser un son auscultatoire [11]. Toutefois, ces produits qui reproduisent le comportement des stéthoscopes acoustiques, sont tout à fait adaptés à une utilisation par un professionnel de santé.

Ils ne conviennent pas au déploiement d'outils de prélèvement à des fins de télémedecine ou de constitution de bases de données pour l'analyse automatique des signaux. La figure 8 illustre le comportement des filtres proposés par ce stéthoscope. Pour sûr, le signal est propre... mais difficile à interpréter. On a supprimé le bruit, pour sûr, mais aussi les bruits et souffles éventuels !



Figure 7. Stéthoscope électronique Cardionics modèle EMS avec casque HeartMan [11].

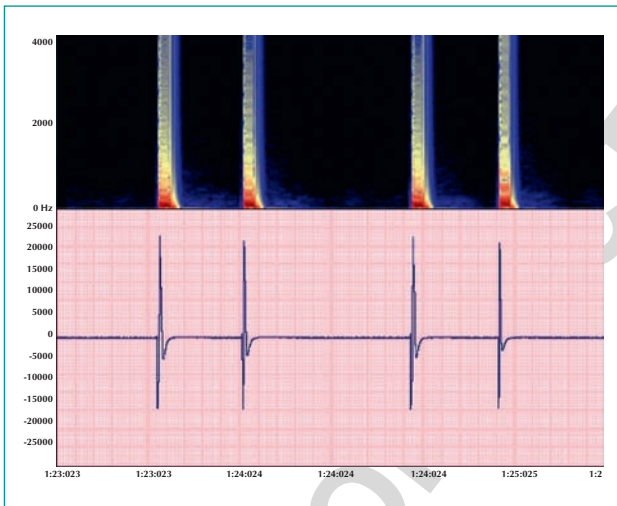


Figure 8. Cardio-phonogramme et spectrogramme issus d'un signal cardiaque prélevé par un stéthoscope Cardionics, à l'aide d'un logiciel développé par Alcatel (démontré à Med-e-tel 2007). La courbe du haut est le spectrogramme du signal, et la courbe du bas le cardio-phonogramme.

CADIScope

Le stéthoscope électronique CADIScope permet une auscultation selon les modes : cœur, poumons ou entéro. Il est couplé à un ECG dont les 3 bornes sont sur le pavillon du stéthoscope. Il permet la visualisation des bruits du cœur (cardiogramme) et de l'ECG (figure 9) [12]. Il est disponible au prix de 510 \$.

CareTone

Le CareTone est commercialisé par American Telecare Inc., dans le Minnesota comme produit homologué dans le domaine de la télésanté [13]. La communication avec



Figure 9. Stéthoscope électronique CADIScope [12].

un équipement de stockage et ou de traitement se fait au moyen d'une liaison série ou RJ-45 pour la transmission sur les réseaux de données (LAN et Internet).

Comme la plupart des équipements classiques, le stéthoscope offre un mode cloche (20-250 Hz) et un mode diaphragme (20-500 Hz) (figure 10) [13]. Le constructeur insiste sur la compression qui est faite sur les signaux auscultatoires, pour ne consommer que 9 600 bits/s sur le réseau. C'est une solution propriétaire et un peu obsolète !

La solution complète s'appuie sur un émetteur, un récepteur, un adaptateur réseau et un serveur, le tout accessible à 2 695 \$.

JABES Electronic Stethoscope, RDSM

JABES Life Sound System est un système auscultatoire utilisant le stéthoscope électronique JABES Electronic Stethoscope et logiciel JABES Life Sound Analyzer [14, 15].

Il permet d'amplifier les sons corporels jusqu'à 20 fois. Une telle amplification permet d'entendre des signaux, qui



Figure 10. Système de collecte des sons développés par Care-Tone.

sont normalement non perçus pour un stéthoscope acoustique, comme les pulsations cardiaques d'un fœtus de 5 mois. Le JABES Life Sound System est a priori suffisamment sensible pour que les patients n'aient pas à enlever leurs vêtements. Les bruits parasites induits par le tremblement des mains et le son ambiant sont supprimés.

Le stéthoscope JABES Electronic Stethoscope offre différents modes d'auscultation : Cloche (Bell), Diaphragme (Diaphragm) ou Large Bande (Wideband) [14, 15]. Il a 7 niveaux de volume. Les réglages se font à l'aide de boutons poussoirs sur le manche du pavillon. Le JABES Electronic Stethoscope a été développé dans le but d'imiter le poids et l'aspect d'un stéthoscope conventionnel comme l'illustre la figure 11.

Le logiciel JABES Life Sound System permet au médecin d'enregistrer les sons corporels des patients directement sur son PC pour la consultation du cardio-ou pneumo-phonogramme [14, 15]. De plus, les sons du cœur, des poumons et la pulsation cardiaque peuvent être visualisés en temps réel, comme l'illustre la figure 12. Les sons corporels captés en analogique peuvent être enregistrés sur un PC, via la liaison micro et la carte son du PC, en format MP3, directement stockés ou enregistrés sur CD. Une analyse ultérieure est possible. Les sons peuvent être envoyés sur internet pour une deuxième opinion ou dans le cadre d'une étude clinique. JABES Life Sound System inclut une base de données de sons auscultatoires.

La figure 13 représente les courbes de réponse d'un stéthoscope JABES dans ses 3 modes (données personnelles de M. R. Gass). On constate que les modes diaphragme et large bande ont une courbe de réponse à peu près plate entre 450 et 2 000 Hz, puis les courbes d'effondrent d'environ 20 dB. La courbe de réponse du mode cloche



Figure 11. Aspect du stéthoscope électronique JABES Electronic Stethoscope [14, 15].



Figure 12. Capture d'écran d'un cardio-phonogramme issu du JABES Life Sound System.

est correcte entre 150 et 300 Hz et en tout cas, elle est très atténuée par rapport aux 2 autres.

Ainsi, ce genre d'équipement peut être satisfaisant pour une utilisation individuelle (médecin dans son cabinet), mais pas pour une opération de collecte, comparaison, et d'analyse des sons (recherche clinique). En effet, il est impossible de connaître l'état du programmeur de mode, et donc la courbe de réponse du stéthoscope au moment de l'enregistrement. Il n'est pas non plus possible de connaître le réglage du volume de l'ampli. En outre, les courbes de réponse ne sont pas identiques entre 2 équipements différents. Il est donc illusoire d'imaginer pouvoir corriger le signal enregistré pour aligner les différents enregistrements sur une même référence.

Par ailleurs, ce stéthoscope fournit des sons analogiques [14, 15]. Il convient donc de connaître également les caractéristiques de l'équipement de numérisation. En

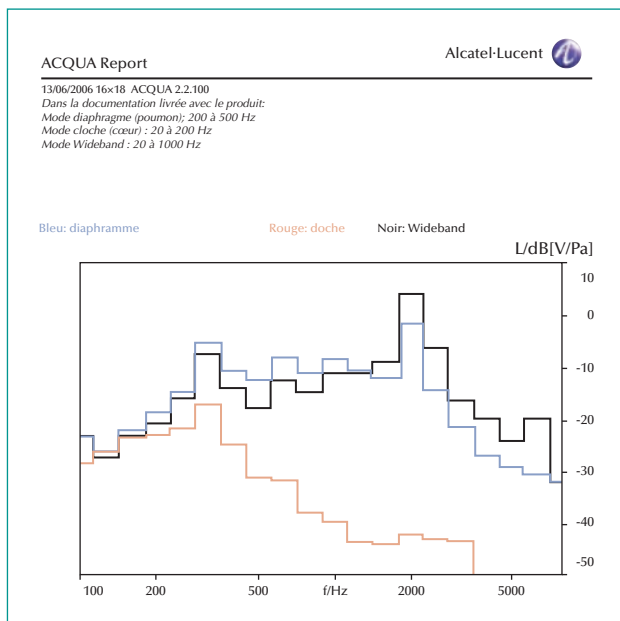


Figure 13. Analyse de la courbe de réponse d'un stéthoscope JABES, suivant ses 3 modes de collecte des sons auscultatoires (données de Mr R. Gass issues de la nouvelle baie de télé phonométrie d'Alcatel-Lucent à Illkirch, France).



Figure 14. Stéthoscope électronique 3M Littmann Electronic Stethoscope Model 4100WS, avec visualisation du signal acoustique sous forme de cardio-phonogramme, dans un 2^e temps, après transmission à un PC [16].

effet, la numérisation par certains équipements de type PC introduit un bruit non négligeable et qui lui est propre.

Enfin, la connexion entre le stéthoscope et l'équipement de type PC est filaire.

Il est à noter que ce système, fabriqué par le Coréen GS TECHNOLOGY CO., LTD. est accessible au prix de 299 à 389 \$.

3M Littmann

La société 3M Littmann, qui est un acteur leader dans le domaine des stéthoscopes médicaux, propose un stéthoscope électronique le 3M Littmann Electronic Stethoscope



Figure 15. Stéthoscope électronique RDSM I-scope 200 [17].

Model 4100WS (figure 14) qui est commercialisé au prix de 465 à 674 \$ [16].

Ce dernier propose une amplification de 18 fois le signal capté, ainsi qu'une solution brevetée par 3M pour supprimer le bruit du pavillon. On y retrouve les possibilités d'imiter le fonctionnement des stéthoscopes acoustiques, avec des filtres Bell (20-200 Hz), Diaphragm (100-500 Hz), and Extended Range (20-1 000 Hz).

Le 4100 permet bien sûr d'enregistrer et de stocker jusqu'à 6 signaux, puis de les transmettre en infrarouge vers un autre stéthoscope 4100 (éducation, diagnostic partagé) [16]. La visualisation, l'écoute et le partage des sons peuvent se faire par la suite, une fois que les sons auront été transmis vers un équipement de type PC. Cela signifie que l'aide indéniable qu'apporte la « visualisation » des sons ne semble pas être possible pendant l'auscultation.

RDSM I-Scope 200

L'I-Scope 200 de RDSM est un stéthoscope électronique classique, dans ce sens qu'il amplifie le signal ($\times 20$), et le filtre dans 3 modes, cloche (20-500 Hz), ou diaphragme (100-1 500 Hz) ou étendu (20-1 500 Hz), pour ausculter le cœur, les poumons, et l'abdomen (figure 15) [17].

Le fabricant est le coréen Dongjin Medical Co., Ltd. Le stéthoscope est disponible au prix d'environ 200 \$.

Stethoflux

Stethoflux est un produit couplant stéthoscope acoustique et doppler intégré à émission continue [18]. Il possède 2 modes d'utilisation. En mode stéthoscopique, il permet une écoute acoustique de qualité. En mode doppler, il offre la possibilité à partir d'un doppler continu avec sonde intégrée et une écoute du signal audible aux oreillettes.



Figure 16. Système de capture des sons, développé par Stethographics, sous forme de coussin équipé de microphones permettant de capter simultanément les sons pulmonaires ou cardiaques, en différents points sur la face postérieure du thorax [20].

Stethographics [STG]

Les travaux les plus pertinents sur le stéthoscope électronique ainsi que sur les outils de visualisation, d'éducation et d'aide au diagnostic ont été réalisés par le Dr R. Murphy, fondateur de la société Stethographics, basée à Boston [19].

La société Stethographics proposait : un stéthoscope électronique, avec connexion via une prise jack à un équipement de type PDA ou PC ; et un coussin équipé de microphones permettant de capter simultanément les sons pulmonaires ou cardiaques, en différents points sur la face postérieure du thorax (figure 16) [20]. Cette technologie permet de réaliser une cartographie 3D des poumons afin de localiser précisément les sources par exemple des crépitations [20]. Le produit n'est plus commercialisé par Stethographics, mais on peut encore trouver des équipements chez certains revendeurs.

Le logiciel développé par Stethographics permet de capturer, afficher, réentendre, et analyser des sons auscultatoires [20]. Il a été prouvé efficace dans l'évaluation de maladies cardiaques, pneumonies, asthmes, et BPCO [20]. Il fournit un résultat objectif en complément d'une auscultation classique avec : un affichage du signal temporel (cardio-phonogramme) (figure 17) et une automatisation du comptage des gros crépitations, des crépitations fins, des ronchi et des sibilants.

Au-delà des outils de visualisation, Stethographics propose sur son site web une large bibliothèque de sons et de représentations sous forme temporelle et sous forme de spectrogramme des signaux pulmonaires ou cardiaques [20]. Stethographics dispose également d'une base pédagogique avec notamment une représentation en 3 dimensions, ce qui permet de localiser les foyers de condensation, par exemple de pneumonie (figure 18).

Thinklabs

Le stéthoscope Thinklabs Medical ds32 permettait une amplification de 50 fois du signal ; les possibilités de fil-

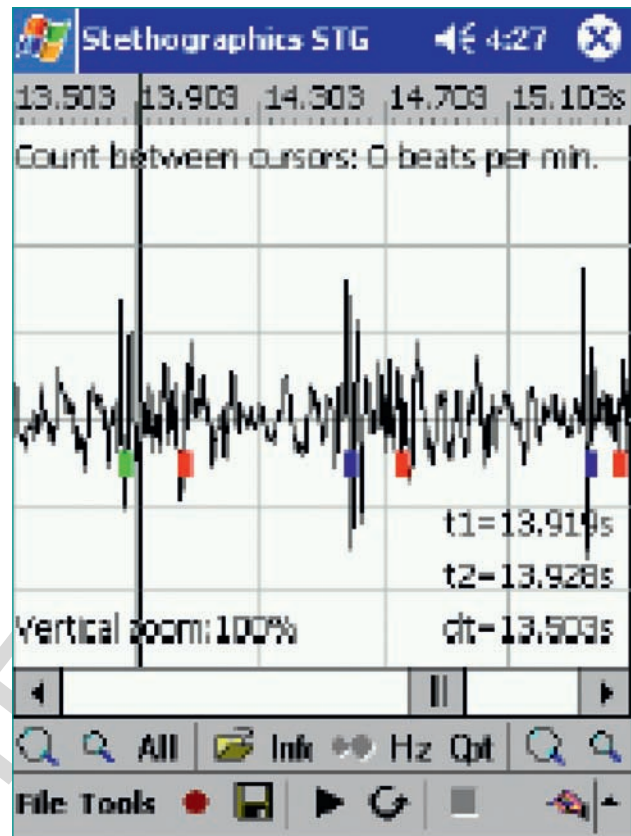


Figure 17. Cardio-phonogramme issu du logiciel Stethographics [20].

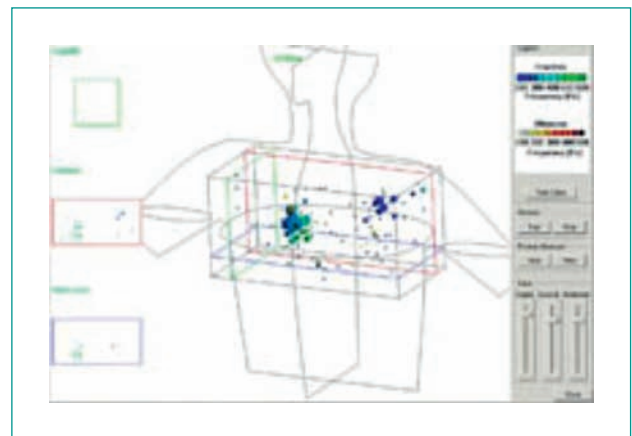


Figure 18. Représentation en 3 dimensions de crépitations par le système Stethographics, ce qui permet de localiser un foyer de condensation, ici de pneumonie [20].

trage sont encore faibles, mais Thinklabs propose depuis 2010 la possibilité de connecter le stéthoscope à un iPhone ou à un iPod (figure 19) [21].

Un logiciel permet la visualisation des représentations temporelles et spectrales du signal.



Figure 19. Stéthoscope de chez Thinklabs avec son logiciel de visualisation [21].



Figure 20. Stéthoscope TR-1/EF de RNK products, Inc. [23].

Les applications visées par Thinklabs sont le stockage ou la transmission du signal, à des fins d'enseignement ou de télémedecine ; il n'y a pas pour l'instant d'aide au diagnostic [21]. Le stéthoscope est commercialisé au prix de 400 à 500 \$.

Une version plus aboutie du système complet Thinklabs One a été développée et est disponible depuis peu [22], permettant la connexion avec les iPhone, iPad et autres smartphones Androïde, avec une amplification potentielle du son jusqu'à 100x.

TR-1/EF

Le TR-1/EF de RNK products, Inc. est un stéthoscope électronique classique, avec des filtres permettant d'imiter : le mode cloche (20 Hz-250 Hz) et le mode diaphragme (20 Hz-1 400 Hz). Il n'y a pas de dispositif de réduction des bruits. La connexion avec un PC se fait par un câble USB (figure 20) [23].

Au-delà du stéthoscope électronique, RNK propose une solution de télésanté qui permet de transporter les



Figure 21. Stéthoscope l'Elite™ Electronic Stethoscope de Welch Allyn avec le logiciel de visualisation des sons sous forme de cardio-phonogramme, ce dernier étant synchronisé avec un signal ECG [24].

signaux auscultatoires sur le réseau téléphonique, des cliniciens qui surveillent la population de patients, des bases de données patients et un serveur de communication [23]. La solution prend également en compte la prise de poids, à l'aide d'un équipement dont une variante communique en Bluetooth.

Welch-Allyn

Welch-Allyn propose une gamme de produits d'auscultation, qui se compose : d'un stéthoscope l'Elite Electronic Stethoscope ; d'un stéthoscope équipé d'un adaptateur qui permet de connecter 5 casques ; et d'un outil informatique pour le stockage et la visualisation du cardio-phonogramme synchronisé avec un signal d'ECG (figure 21) [24].

La gamme de fréquences prise en compte par le stéthoscope est de : 20 Hz à 20 kHz, avec les filtres classiques ; 20 à 420 Hz avec le mode cloche ; et 350 à 1 900 Hz avec le mode diaphragme [24].

La grande particularité de ce stéthoscope est qu'il dispose, en plus, d'un ECG intégré. Cependant, aucun outil d'analyse, d'archivage ou d'affichage n'est fourni.

Le matériel est accessible dans le commerce au prix de 225 à 340 \$.

Wise

Le WISE LIFE W10 est fabriqué et distribué (240 \$) par Sunmeditec Co., Ltd. (4Fl, Business Incubator Center, 1070, Vision College of Jeonju, Jeonju, 560-760, South Korea) (figure 22) [25]. Il propose 3 modes de fonctionnement, cloche (20-350 Hz), diaphragme (350-1 200 Hz), étendu (20-2 000 Hz).

Il est équipé d'un dispositif d'atténuation du bruit, et d'une possibilité de communication sans fil (non Bluetooth) vers un récepteur, qui est lui raccordé au PC via USB, et d'un logiciel pour le stockage, la visualisation et l'analyse du signal [25]. Des photos d'écran sont dispo-



Figure 22. Stéthoscope WISE LIFE W10 [25].

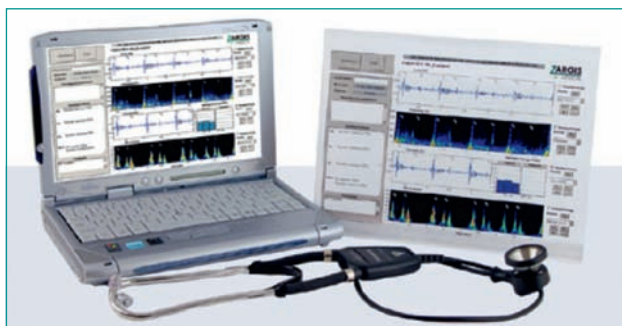


Figure 23. Système Zargis Acoustics Cardioscan avec la visualisation du signal sous forme de cardio-phonogramme et cardio-spectrogramme [26].

nibles sur le site du fabricant. On y retrouve la visualisation simultanée des représentations temporelles et spectrales du signal, avec une coloration particulière pour mettre en évidence les signaux pathologiques.

Zargis Acoustics Cardioscan

Zargis Acoustics Cardioscan est un stéthoscope « intelligent », qui enregistre et analyse les sons cardiaques [26]. Il repose sur un stéthoscope électronique connecté à un PC, avec une possibilité de visualisation des sons cardiaques sous forme notamment de cardio-phonogramme et cardio-spectrogramme (figure 23).

Cardioscan est un outil d'auscultation électronique, fournissant au médecin une évaluation des sons cardiaques de ces patients. L'identification des sons inclue la détection de B1, B2 et des bruits cardiaques ajoutés (souffles...). Les résultats de la validation clinique ont démontré que Cardioscan possède une sensibilité de 91,8 % et une spécificité de 68,0 % dans la détection des souffles cardiaques [26].

Cardioscan tutor est un système d'éducation non invasif qui analyse les enregistrements de sons cardiaques pour détecter la présence d'un murmure suspect. Le système utilise des algorithmes propriétaires pour identifier B1, B2, et les souffles cardiaques. Une interface graphique permet une représentation conviviale des résultats [26].

Les stéthoscopes de seconde génération

Les prototypes Alcatel-Lucent

Au cours du salon Medetel 2007 [27], nous avons présenté un prototype Alcatel-Lucent de stéthoscope électronique communicant et « intelligent ». Le prototype d'Alcatel-Lucent offre 4 avantages essentiels par rapport aux stéthoscopes de 1^{ère} génération et aux autres de seconde génération actuellement disponible :

- utilisation de la technologie Bluetooth pour la transmission en temps réel des signaux auscultatoires ;
- visualisation pendant l'auscultation du cardio- ou pneumo-phonogramme et du spectrogramme du signal auscultatoire ;
- possibilité de documenter l'enregistrement (informations relatives au patient, au médecin, à l'endroit où le son a été prélevé) ;
- compatibilité des signaux avec les réseaux téléphoniques.

Une partie de ces prototype a été développée dans le cadre de projets de recherche collaboratifs entre Alcatel-Lucent et diverses institutions à travers les projets que nous avons menés dans cette thématique (STETAU – DGE 2004 ; ASAP – ANR Technologie 2006 ; ICARE – Europe 2002 ; PRI – CHRU 2009 ; MARS 500 – CNES 2010), autour d'Alcatel-Lucent, le CHRU, la Faculté de Médecine et l'Université de Strasbourg [5, 28-30].

Les 1^{ers} prototypes qui ont été développés (figure 24) s'appuyaient sur les combinés Bluetooth développés par la société Alcatel-Lucent.

L'électronique des combinés Bluetooth a été modifiée de façon à permettre une meilleure prise en compte des signaux basse fréquence, ainsi qu'on peut le voir sur la partie gauche de la courbe de réponse issue de la nouvelle baie de téléphonométrie d'Alcatel-Lucent à Illkirch (figure 25) [5].

Les stéthoscopes électroniques ont une courbe de réponse quasiment plate de quelques dizaines de Hertz à 4 000 Hz. Ils transmettent en temps réel les signaux en Bluetooth vers un équipement de traitement de type PC, tablette, PDA, Smartphone, téléphone sur IP.

Pour mémoire, les sons ou bruits respiratoires sont caractérisés par un large spectre sonore, avec une fréquence moyenne dépendant du point d'auscultation [30]. Au niveau de la trachée, le son respiratoire normal est



Figure 24. Prototypes de stéthoscopes électroniques développés par la Société Alcatel-Lucent (données de M. R. Gass) [5].

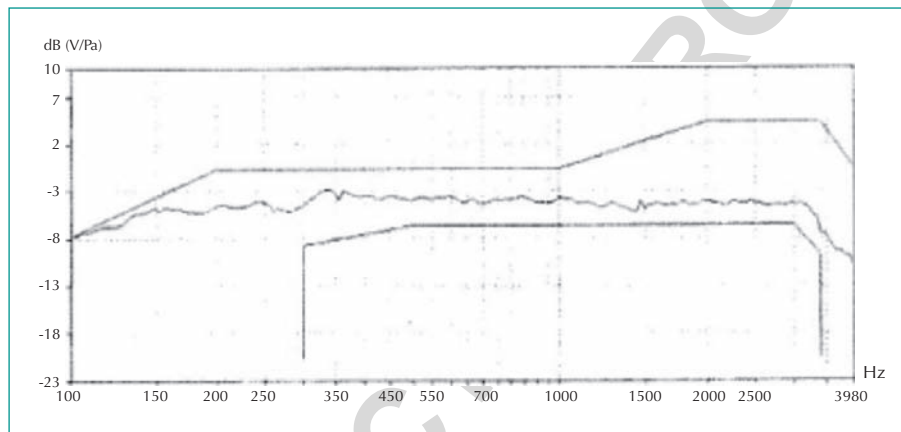


Figure 25. Courbe de réponse des prototypes de stéthoscope électronique développés par Alcatel-Lucent (données de Mr R. Gass issues de la nouvelle baie de télé phonométrie d'Alcatel-Lucent à Illkirch, France).

caractérisé par un large spectre de bruit (contenant des composantes hautes fréquences), audible à la fois durant la phase d'inspiration et celle d'expiration. Le spectre des sons trachéaux est situé entre 60 et 600 Hz pour l'inspiration et entre 60 et 700 Hz pour l'expiration. Au niveau du thorax, le son respiratoire normal, à savoir le murmure vésiculaire, est caractérisé par un faible bruit, faible pendant l'inspiration et très audible pendant l'expiration pendant l'inspiration. Il est généralement admis que la fréquence des sons pulmonaires se situe dans la plage entre 50 et 2 500 Hz, celle des sons trachéaux pouvant aller jusqu'à 4 000 Hz. La *figure 26* illustre l'apport des outils de visualisation du signal sur un cycle respiratoire.

Le spectre des sons cardiaques est compris entre 20 et 100 Hz pour les signaux de base, et des fréquences plus élevées pour les souffles : 500 Hz et au-delà [29, 30]. L'auscultation cardiaque met en évidence les bruits du cœur ; on constate normalement 2 bruits : B1 (S1*) correspondant à la fermeture des valves mitrales et tricuspides et B2 (S2*) relevant de l'ouverture des sigmoïdes aortiques et pulmonaires. B1 est composite, complexe intégrant des fréquences de l'ordre de 10 à 100 Hz. B2 est de plus haute fréquence en général bien

représenté dans la gamme de fréquence entre 150 et 200 Hz. Pendant la phase diastolique, on peut avoir des bruits cardiaques supplémentaires : B3 (S3*) ou galop de sommation proto-méso-diastolique signant une grande détérioration du myocarde et B4 (S4*) ou galop pré-systolique. Il est à noter que l'on peut encore observer des bruits diastoliques supplémentaires d'origine valvulaires : claquement d'ouverture mitrale, roulements de débit ou bruits d'origine péricardiques. . . Enfin, on décrit également les souffles dits organiques qui sont liés à des altérations des valves auriculo-ventriculaires (mitrales ou tricuspides) ou des valves ventriculo-aortiques ou pulmonaires [29, 30]. Ces souffles peuvent survenir dans les 2 temps de la contraction cardiaque. Ceux issus du cœur gauche sont, en général, les plus facilement audibles.

L'ensemble de ces données montrent l'importance du choix du capteur (microphone) et de sa courbe de réponse qui doit être « plate » entre 10 et 4 000 Hz pour capter l'ensemble du spectre des bruits cardiaques et pulmonaires humains, ce que montre la *figure 25*.

L'outil informatique permettant de visualiser en temps réel la représentation temporelle et la représentation spectrale du signal a fait preuve de son intérêt dans une démarche pédagogique [28-31].

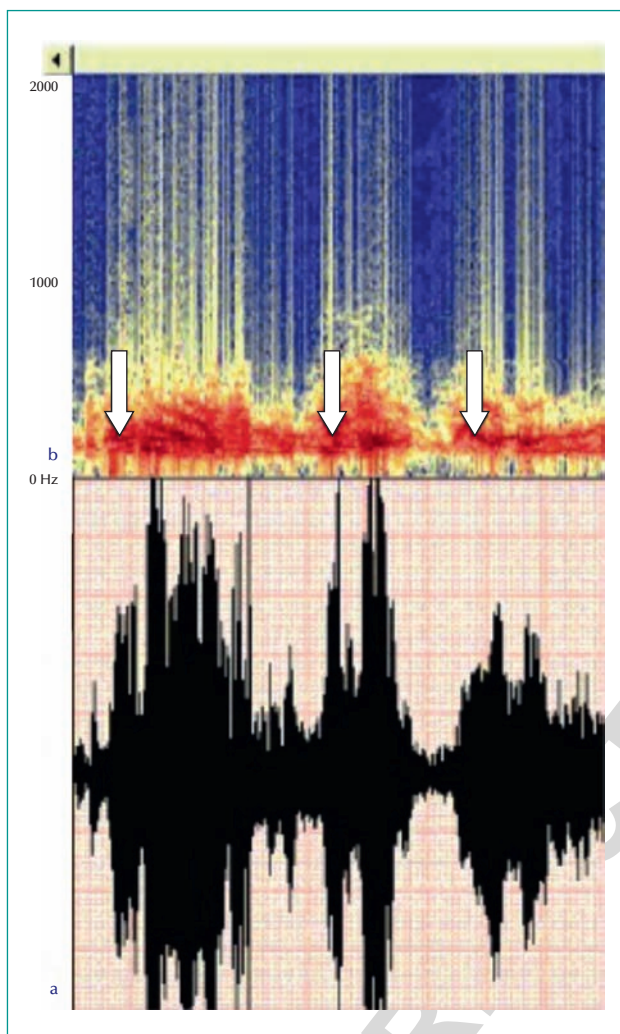


Figure 26. Représentation d'un cycle respiratoire chez un sujet ayant une bronchopneumopathie chronique obstructive avec des phases d'inspiration, d'expiration et de repos sous forme d'un pneumo-phonogramme (A) et d'un spectrogramme (2b). Présence de nombreux gros crépitations surtout visible sur le spectrogramme (B) (indiqués par les flèches blanches) (figure issue du projet de recherche ASAP [équipés du Professeur E. Andrès pour le CHRU de Strasbourg et de R. Gass pour Alcatel-Lucent], convention ANR n° 2006 TLOG 21 04).

Trente étudiants inscrits en 2^e cycle des études de médecine, à la Faculté de Médecine de Strasbourg (Université de Strasbourg), ont été soumis à 10 sons pathologiques respiratoires et cardiaques (issus du projet ASAP [ANR Technologie 2006]), sans et avec l'apport des phono- et spectrogramme. Les étudiants sont évalués pour les bons diagnostics par questionnaire à J0 (uniquement sur les données acoustiques) et J28 (à l'aide des données acoustiques et visuelles) [31]. À J0, on observe 45 % de bons diagnostics pour la totalité des étudiants. Pour les sons respiratoires et cardiaques, on observe respectivement 51 %

et 40 % de diagnostics exacts. À J28, 80 % de bons diagnostics sont rapportés pour la totalité des étudiants ($p < 0,01$ par rapport à J0), avec 70 % de diagnostics exactes pour les sons respiratoires ($p = 0,058$) et 89 % pour les sons cardiaques ($p < 0,009$) [31].

Par la suite, divers travaux académiques ont été menés pour permettre une analyse automatisée des sons respiratoires et cardiaques, permettant par là même une reconnaissance des bruits normaux (bruits du cœur B1, B2...) et de certains sons pathologiques (crépitations, sibilants...) et de rendre le stéthoscope relativement « intelligent » [5, 28-34].

Ce produit couvert par de nombreux brevets a été démontré dans de nombreux salons en Europe, au Canada, en Australie. Il a fait l'objet d'un projet de collaboration avec l'Université de Pittsburg aux USA (UPMC, University of Pittsburgh Medical Center). La société US Battelle également membre de ce projet collaboratif a développé la maquette représentée sur la figure 27 [5].

3M Littmann 3200

Le 3M Littmann 3200 reprend la technologie brevetée 3M de suppression de bruit, qui permet une amplification 24× de signaux débarrassés des bruits parasites [35]. Il est équipé d'une batterie qui permet un fonctionnement continu de 60 heures.

Le Littmann 3200 possède toutes les fonctionnalités du Littman 3100, mais il a toutefois une fonctionnalité supplémentaire qui est sa capacité à enregistrer des sons, les partager et les analyser [35]. L'auscultation peut simplement être enregistrée pour être réécoutée plus tard en toute tranquillité. À l'aide de la connexion Bluetooth, ces sons enregistrés peuvent être envoyés vers un PC. Zargis Medical fournit un logiciel qui permet une première analyse rapide. Ensuite, il est possible de partager les bruits avec des collègues qui peuvent procéder à une analyse plus poussée et donner leur diagnostic. Le logiciel se compose de deux parties. La première partie permet de visualiser le signal audio et peut être très pratique pour un réglage fin. La seconde partie aide le médecin à identifier des souffles soupçonnés et à les classer.

Avec le logiciel développé par Zargis Cardioscan, qui est fourni gratuitement avec le stéthoscope, le 3M Littmann 3200 offre donc les mêmes fonctionnalités que celles qui avaient été démontrées par Alcatel-Lucent, à savoir : la connexion Bluetooth, la visualisation des représentations temporelles (phonogramme) et spectrales (spectrogramme) du signal, la possibilité d'enregistrer un signal, l'affichage du rythme cardiaque, l'enregistrement de paramètres supplémentaires relatifs au patient et à l'auscultation, permettant de classer les signaux, le playback et le playback ralenti dans les 3 modes (Bell [20-200 Hz], Diaphragm [100-500 Hz], Extended [20-1 000 Hz]) (figure 28) [35].



Figure 27. Prototypes de stéthoscope électronique développés dans le cadre de projets collaboratifs incluant Alcatel-Lucent par la Société US Battelle.



Figure 28. Stéthoscope électronique 3M Littmann 3200.

Le stéthoscope Littmann offre en plus d' Ambient Noise Reduction (ANR), également Frictional Noise Reduction (FNR), le tout faisant appel à un traitement du signal à l'aide de méthodes d'ondelettes sophistiquées [35]. L'ANR amélioré diminue les bruits ambiants dans une ambiance bruyante, une ambulance ou une salle d'opération. Le FNR fait en sorte d'atténuer les bruits qui résultent de l'utilisation du stéthoscope (à la suite de frictions).

Par ailleurs, le logiciel développé par Zargis Cardioscan permet de mettre en évidence certaines pathologies cardiaques. Il fournit un nouveau système de détection de souffle cardiaque et des marqueurs B3/B4 d'intensité, de fréquence et de temps, développé des scientifiques Biosignetics.

Le Littmann 3200 est associé à un outil éducatif, combinant la perception audio et l'affichage et met à disposition une base de données de sons cardiaques normaux et pathologiques.

La représentation graphique peut être imprimée et mémorisée automatiquement au format MS Excel [35]. Le rapport automatique des caractéristiques de travail avec

MS Word améliore l'utilisation du stéthoscope électronique.

Ce stéthoscope est disponible au prix de 379 à 500 \$.

Conclusion

Comme nous venons de le voir à travers cette revue de la littérature, des progrès considérables ont été réalisés ces dernières années tant dans le perfectionnement des outils d'écoute, avec la mise à disposition de stéthoscopes électroniques, que dans l'analyse et la description des signaux auscultatoires. Ces progrès ont abouti à la mise à disposition des Praticiens de stéthoscopes communicants et intelligents, faisant entrer, la séméiologie auscultatoire et le stéthoscope dans le XXI^e siècle.

C'est d'autant plus vrai qu'actuellement, ces outils sont couplés avec des outils apportant d'autres informations utiles au praticien, à l'analyse des signaux auscultatoires et de la situation clinique comme l'ECG, de l'échographie doppler.

Liens d'intérêts : Q1

Références

1. Andrès E, Gass R, Brandt C, Reichert S, Collet C, Nguyen G, Baldassari C. De nouveaux outils au service de l'auscultation. *IRBM* 2008 ; 29 : 337-9.
2. Laennec R. *Traité de l'auscultation médiate*. Paris, 1819.
3. Berche P. Un siècle d'innovations en médecine « et les vingt prochaines années ». *XIIIe Assises Hospitalo-Universitaires*, Lyon 2-3 décembre 2010.
4. Reichert S, Gass R, Brandt C, Andrès E. L'auscultation pulmonaire à l'ère de la médecine factuelle. *Rev Mal Respir* 2008 ; 25 : 674-82.
5. <http://www.telemedecine-alsace.fr/>, site consulté en mai 2015.

6. http://www.robe-materiel-medical.com/images/files/mode_emploi_stthoscope_electronique_adscope.pdf, site consulté en mai 2015.
7. http://www.stethographics.com/main/products_stetho_i.html, site consulté en mai 2015.
8. http://www.companylisting.ca/Andromed_inc/default.aspx, site consulté en mai 2015.
9. Andrès E, Brandt C, Gass R, Reichert S. Nouveaux développements dans le domaine de l'auscultation. *Rev Pneumol Clin* 2010 ; 66 : 209-13.
10. <http://bsignetics.com/>, site consulté en mai 2015.
11. <http://www.cardionics.com/>, site consulté en mai 2015.
12. http://www.accessdata.fda.gov/cdrh_docs/pdf/k990809.pdf, site consulté en mai 2015.
13. <http://www.horizonmedical.co.uk/steth.html>, site consulté en mai 2015.
14. <http://www.americantelecare.com/>, site consulté en mai 2015.
15. <https://www.youtube.com/watch?v=J5PCakA15Yg>, site consulté en mai 2015.
16. <http://multimedia.3m.com/mws/media/369448O/3mtm-littmannr-stethoscopes.pdf>, site consulté en mai 2015.
17. http://www.digital-stethoscope.com/eng/sub02/sub02_01.htm, site consulté en mai 2015.
18. <http://urlmetriques.co/www.stethoflux.com>, site consulté en mai 2015.
19. Murphy R, Vyshedskiy A, Power-Charnitsky VA, Bana DS, Marinelli PM, Wong-Tse A, Paciej A. Automated lung sound analysis in patients with pneumonia. *Respiratory Care* 2004 ; 49 : 89-102.
20. <http://www.stethographics.com/>, site consulté en mai 2015.
21. <http://www.thinklabs.com/#!ds32-digital-stethoscope/cr76>, site consulté en mai 2015.
22. <http://www.thinklabs.com/>, site consulté en mai 2015.
23. <http://www.telehealthtechnology.org/toolkits/electronic-stethoscopes/assessment-process/product-cut-sheets/tr-1ef-telehealth-technologies>, site consulté en mai 2015.
24. <http://intl.welchalln.com/apps/products/product.jsp?region=uk&id=11-ac-100-0000000001174>, site consulté en mai 2015.
25. <http://telehealthtechnology.org/toolkits/electronic-stethoscopes/assessment-process/product-cut-sheets/wise-life-w10>, site consulté en mai 2015.
26. <http://multimedia.3m.com/mws/media/594654O/zargis-cardio-scan-user-manual.pdf>, site consulté en mai 2015.
27. <http://www.medetel.eu>, site consulté en mai 2015.
28. Andrès E, Gass R, Brandt C, Reichert S, Collet C, Nguyen G, Baldassari C. De nouveaux outils au service de l'auscultation. *IRBM* 2008 ; 29 : 337-9.
29. Reichert S, Gass R, Brandt C, Andrès E. Analysis of respiratory sounds: state of the art. *Clinical Medicine Circulatory Respiratory Pulmonary Medicine* 2008 ; 2 : 45-58.
30. Reichert S, Gass R, Hajjam A, Brandt C, Nguyen E, Baldassari K, Andrès E. The ASAP project: a first step to an auscultation's school creation. *Respiratory Medicine CME* 2009 ; 2 : 7-14.
31. Andrès E, Brandt C, Mecili M, Meyer N. Intérêt d'une démarche pédagogique structurée associée à de nouveaux outils de visualisation des signaux auscultatoires dans le cadre de l'apprentissage de la séméiologie auscultatoire: étude prospective auprès de 30 étudiants du deuxième cycle des études médicales. *Pédagogie Médicale* 2012 ; 13 : 39-50.
32. Reichert S, Gass R, Andrès E. Analyse des sons auscultatoires pulmonaires. *ITBM-RBM* 2007 ; 28 : 169-80.
33. Moukadem A, Dieterlen A, Brandt C. Automatic heart sound analysis module based on Stockwell Transform. Applied on auto-diagnosis and telemedicine applications. *eTELEMED* 2013, 24-29 February, Nice, France.
34. Moukadem A, Dieterlen A, Hueber N, Brandt C. A robust heart sounds segmentation module based on S-transform, *Biomedical Signal Processing and Control* (2013), <http://dx.doi.org/10.1016/j.bspc.2012.11.008>.

Question à l'auteur

Q1 A déclarer

UNCORRECTED PROOF