

UTILISATION D'UNE BASE DE DONNEES NUMERIQUE D'AUSCULTATIONS CARDIAQUES POUR LA RECHERCHE D'ASSOCIATIONS ENTRE LE TROISIEME BRUIT CARDIAQUE (B3) ET LES ANOMALIES ECHOGRAPHIQUES CHEZ LES PATIENTS AYANT UNE INSUFFISANCE CARDIAQUE

GEORGES BEDIANG^{1}, CHRIS NADÈGE NGANOU-GNINDJIO¹,
JEAN YOMKIL BAYE¹, FRED GOETHE DOUALLA¹,
JACQUELINE ZE MINKANDE¹*

¹ *Faculté de Médecine et des Sciences Biomédicales,
Université de Yaoundé 1, Cameroun*

**Auteur correspondant :*

Dr Georges Bediang

Faculté de Médecine et des Sciences Biomédicales,
Université de Yaoundé 1
B.P: 1364, Yaoundé, Cameroun
Tél : +237 699 58 85 74
E-mail: bediang@yahoo.com

RESUME

Introduction : Le pronostic de l'insuffisance cardiaque (IC) dépend de la précocité du diagnostic (auscultation cardiopulmonaire adéquate, examen échocardiographique), du traitement et d'un plan de suivi adéquats. Cependant, du fait des difficultés d'accès aux soins liées à une insuffisance d'équipement et de personnel qualifié, le développement d'approches peu coûteuses, fiables et non invasives pour le suivi de l'IC est souhaitable dans notre contexte. L'objectif de ce travail était de rechercher les associations qui existeraient entre le troisième bruit cardiaque (B3) et les anomalies structurales et fonctionnelles perçues à l'échocardiographie chez les patients ayant une IC, en s'appuyant sur une base de données d'auscultations annotées (BDAA).

Méthodes : Il s'agit d'une étude pilote, transversale et descriptive menée au service de cardiologie de l'Hôpital Central de Yaoundé entre Octobre 2017 à Mai 2018. Des auscultations cardiaques ont été réalisées à l'aide d'un stéthoscope électronique auprès des patients présentant une IC. Ces auscultations ont été enregistrées et annotées selon un protocole validé afin de constituer une BDAA. Chaque participant a également bénéficié d'un examen d'échocardiographie.

Résultats : 50 participants ont été recrutés avec une moyenne d'âge de $63 \pm 13,34$ ans. Le souffle cardiaque (36 %) et le B3 (26 %) étaient les anomalies auscultatoires les plus retrouvées. Les anomalies les plus retrouvées à l'échocardiographie étaient : la dilatation de l'oreillette gauche (56 %), la réduction de la fraction d'éjection ventriculaire gauche (48 %) et l'hypertrophie du ventricule gauche (36 %). La présence du B3 était associée de manière statistiquement significative à la réduction de la fraction d'éjection du ventricule gauche (OR=5,4 IC 95% [1,28-23,37]) et à l'hypertrophie du ventricule gauche (OR=4,3 IC 95% [1,14-16,37]).

Conclusion : La présence du B3 à l'auscultation cardiaque peut être considérée comme un facteur prédictif de la présence d'anomalies à l'échocardiographie telles que la réduction de la fraction d'éjection du ventricule gauche et l'hypertrophie du ventricule gauche. L'utilisation d'outils numériques constitue un support pour la description détaillée des anomalies à l'auscultation et pour la recherche d'associations entre ces anomalies auscultatoires et échocardiographiques.

Mots clés : Insuffisance cardiaque, Base de données numérique d'auscultation cardiaque, Troisième bruit du cœur, Echocardiographie.

INTRODUCTION

« L'insuffisance cardiaque est un état où le cœur n'est plus à même de perfuser suffisamment les organes périphériques au repos ou à l'effort. » [1]. C'est un syndrome progressif causé par des étiologies différentes telles que la maladie coronarienne, l'hypertension artérielle, une maladie valvulaire etc [2–4]. Dans le monde, elle touche 2-4 % de la population générale, soit plus de 23 millions de personnes [5]. En Afrique, elle constitue la principale circonstance de découverte des maladies cardiovasculaires (MCV) [6]. Au Cameroun, l'IC a une prévalence hospitalière de 30 % et une mortalité globale estimée à 9,3 % [7]. Le pronostic de l'IC est en général sombre et dépend de la précocité du diagnostic, du traitement et du suivi. L'échographie permet de diagnostiquer l'IC avec une grande spécificité et de caractériser le tissu cardiaque avec une bonne précision [8]. Elle contribue également à la

surveillance de phénomènes cardiaques impliqués dans le pronostic de l'IC.

Cependant, les difficultés d'accès aux soins, l'insuffisance d'équipement et de personnel qualifié rendent difficile le contrôle de cette pathologie [9]. Compte tenu de ces facteurs limitants, il y a nécessité de développer des approches fiables, peu coûteuses et non invasives qui visent à améliorer l'auscultation pour la surveillance d'une telle pathologie [10–16]. La possibilité de transformer les sons cardiaques en signaux numériques, a permis de développer le stéthoscope électronique avec ses différentes applications (enregistrement, utilisation de filtres, partage et stockage) et d'améliorer leur perception au cours d'une auscultation (possibilité de réécouter, de décrire ou d'annoter de manière détaillée ou de recevoir un avis) [17–20]. Des études ont pu mettre en évidence l'utilité d'une bonne perception numérique des sons dans l'évaluation de la gravité de la pathologie valvulaire ou l'association entre la présence du 3^{ème} bruit cardiaque

(B3) et la réduction de la fraction d'éjection ventriculaire gauche [21, 22]. L'objectif de ce travail était de rechercher les associations qui existeraient entre le troisième bruit cardiaque (B3) et les anomalies structurelles et fonctionnelles perçues à l'échocardiographie chez les patients ayant une IC, en s'appuyant sur une base de données d'auscultations annotées (BDAA).

METHODOLOGIE

Design et site de l'étude

Il s'agissait d'une étude transversale descriptive menée au service de cardiologie de l'Hôpital Central de Yaoundé (HCY). Elle consistait à recruter des participants ayant une IC et chez qui il était effectué une auscultation et un enregistrement des bruits cardiaques afin de constituer une base de données numérique d'auscultation cardiaque (BDAA). Cette BDAA était par la suite écoutée et annotée par l'équipe de recherche. Chaque participant, bénéficiait également d'une échographie cardiaque. L'existence de corrélations entre le B3 (perçu à l'auscultation) et les anomalies structurelles et fonctionnelles objectivées à l'échographie cardiaque étaient recherchées.

Participants et critères d'inclusion

Étaient inclus dans cette étude, tous les participants avec une IC, quel que soit le stade, âgés d'au moins 21 ans, ayant réalisé une échographie cardiaque de confirmation et ayant donné leur consentement libre et éclairé.

Échantillonnage

En tant qu'étude pilote, la taille de l'échantillon était définie par

convenance à savoir 50 patients ayant une IC.

Méthode

La méthode utilisée s'est basée sur quatre points essentiels : la formation aux outils d'enregistrement et d'annotation des bruits cardiaques, l'enregistrement des bruits cardiaques et la constitution d'une base de données numérique d'auscultation cardiaque (BDAA), la réalisation d'exams d'échographie cardiaque et enfin, l'annotation.

Formation aux outils d'enregistrement et d'annotation des bruits cardiaques

Un assistant de recherche (étudiant en 7^e année d'études médicales) a été formé sur le stéthoscope connecté de marque 3M Littmann 3200. Le but de cette formation était d'acquérir des connaissances théoriques et pratiques sur l'utilisation du stéthoscope électronique et les différents logiciels. Le logiciel Littmann StethAssistTM [23] est le logiciel qui permet de faire fonctionner ledit stéthoscope et de le connecter à un ordinateur. Il dispose des fonctionnalités de collecte, de filtrage, stockage et de partage des sonorités numériques issues de l'auscultation. Le logiciel Audacity [24] quant à lui, est un logiciel de traitement audio qui permettait d'importer et d'annoter (labéliser) les sons cardiaques.

Auscultation, enregistrement des bruits cardiaques et constitution de la base de données numérique d'auscultation cardiaque (BDAA)

Les participants respectant les critères d'inclusion étaient recrutés en consultation dans le service de cardiologie de l'HCY. Après une explication de l'étude et l'obtention de l'accord de participation, chaque participant était installé dans une salle calme, en position assise. Une auscultation cardiaque était effectuée du haut vers le bas sur 5 foyers d'auscultation cardiaque à l'aide du stéthoscope électronique Littmann 3200. Ces 5 foyers cardiaques (figure 1) étaient : le foyer

aortique (deuxième espace intercostal droit), le foyer pulmonaire (deuxième espace intercostal gauche), le foyer d'Erb (troisième espace intercostal gauche bord du sternum), le foyer tricuspide (à la base de l'appendice xiphoïde), et le foyer mitral (quatrième espace intercostal gauche en dedans de la ligne médio claviculaire). Pour chacun des foyers, le stéthoscope électronique connecté à un ordinateur était maintenu sur le thorax par une ceinture thoracique (figure 2). Cette technique permettait d'optimiser la qualité des auscultations cardiaques à travers une meilleure stabilisation du stéthoscope sur le thorax et une réduction des frottements qui sont la cause de bruits parasites.

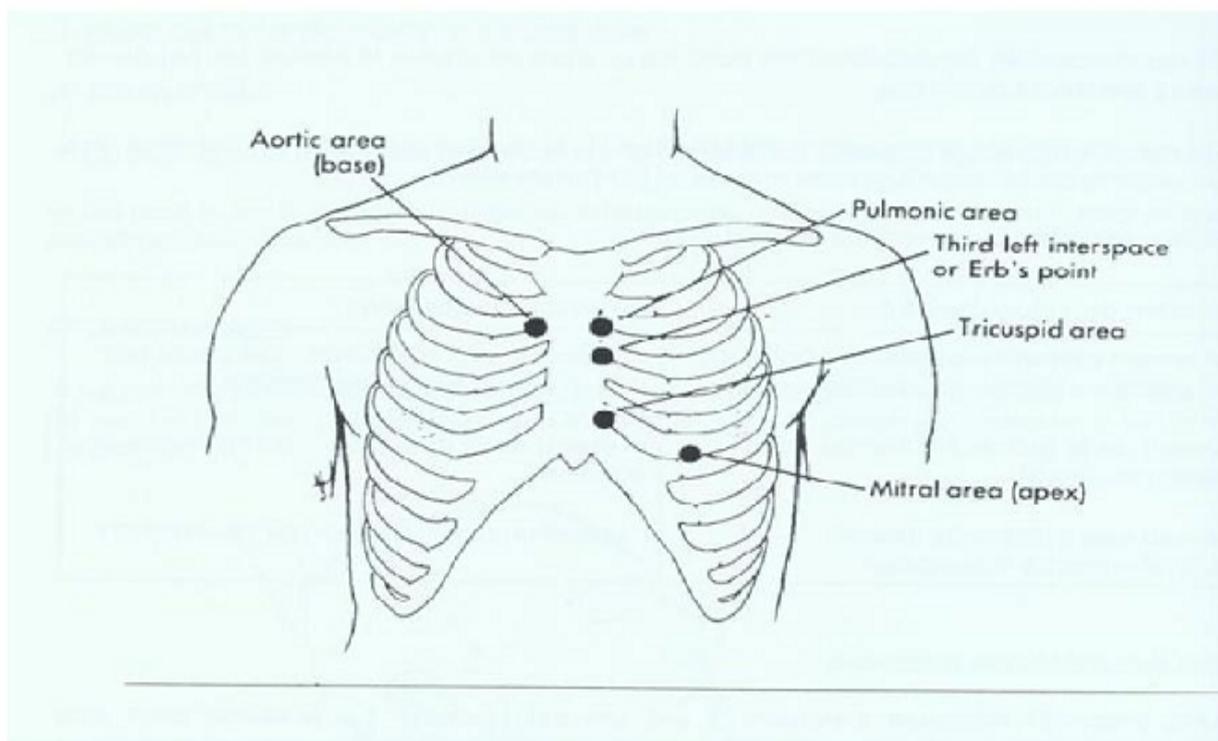


Figure 1 : Foyers d'auscultation cardiaque [25]

Chez chaque participant, les sons issus de l'auscultation étaient enregistrés et stockés dans un ordinateur portable. À la fin de l'auscultation d'un participant, nous disposions de 5 fichiers numériques audio d'une durée de 15 secondes correspondant aux 5 foyers et de 1 fichier numérique supplémentaire d'une durée d'une minute au foyer mitral, soit au total 6 fichiers numériques audio d'une durée totale de 135 secondes par patient. Ces fichiers audios étaient enregistrés au format *.zsa puis convertis en format *.wav. Ce

procédé nous a permis d'obtenir une BDAA pour les 50 participants avec 300 fichiers numériques audio d'enregistrement de sons cardiaques d'une durée de 6750 secondes (environ 1 h 53 min).



Figure 2 : Principe d'utilisation d'une ceinture thoracique au cours de l'auscultation

Réalisation des échographies cardiaques

Une échographie cardiaque a été réalisée chez chaque participant à l'aide d'un appareil de marque Philips iE33. Les paramètres recherchés étaient :

- La fraction d'éjection du ventricule gauche par la méthode Simpson biplan (classée préservée si supérieure ou égale à 55 % et réduite si inférieure à 55 % [26, 27])
- La dilatation de l'oreillette gauche (présente si la surface de l'oreillette gauche était supérieure à 20 cm²)[28]
- L'hypertrophie du ventricule gauche (présente si le diamètre du ventricule gauche en diastole était supérieur ou égal à 5,4 cm chez la femme et à 6 cm chez l'homme) [28]

- L'hypertrophie de la paroi postérieure (présente si l'épaisseur de cette paroi était supérieure ou égale à 1 cm chez la femme et à 1,1 cm chez l'homme) [28]
- L'hypertrophie du septum interventriculaire (présente si l'épaisseur de ce septum était supérieure ou égale à 1 cm chez la femme et 1,1 cm chez l'homme) [28].

Annotation des fichiers numériques audio d'enregistrement des bruits du cœur

En utilisant un modèle d'annotation préétabli à l'avance par l'équipe de recherche, les deux principales étapes étaient : la pré-annotation et l'annotation proprement dite. La pré-annotation qui était effectuée par l'assistant de recherche consistait en l'annotation des bruits cardiaques

physiologiques (B1, B2). L'annotation proprement dite quant à elle, qui était effectuée par un médecin cardiologue, consistait en l'annotation des bruits cardiaques pathologiques (B3, B4, souffles, etc.). Tout au long de ce processus, plusieurs activités de suivi et de validation du processus d'annotation

étaient mises en œuvre. Elles visaient à s'assurer de la présence de tous les fichiers requis, du respect du modèle d'annotation, de la qualité et de la conformité de la pré-annotation et de l'annotation. L'annotation des fichiers audio s'est faite en utilisant le logiciel Audacity

(figure 3). L'annotation de chaque fichier audio permet d'obtenir un fichier de données au format *.txt utilisable par les programmes informatiques.

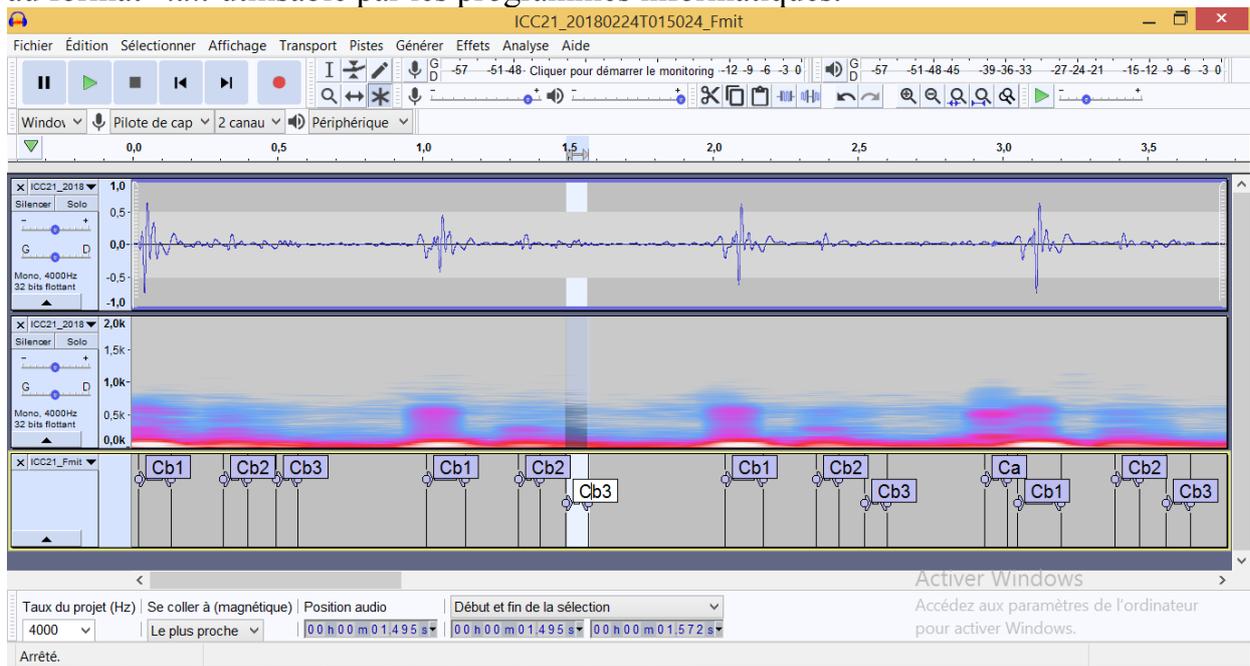


Figure 3 : Annotation fichier audio au foyer mitral avec B3 présent

Collecte de données

Les données ont été collectées à l'aide d'un questionnaire prétesté et administré par l'équipe de recherche. Ce questionnaire collectait les informations sur les caractéristiques des participants (âge, genre, motif de consultation, stade clinique de l'insuffisance cardiaque selon la New York Heart Association, facteurs de risque cardiovasculaire associé); les anomalies retrouvées au cours de l'annotation des fichiers audio issus de l'auscultation cardiaque (B3, B4, souffles) et les anomalies retrouvées à l'échographie.

Critères de jugement

Le critère de jugement primaire était l'association entre le troisième bruit cardiaque (B3) et la fraction d'éjection du ventricule gauche.

Les critères de jugements secondaires étaient : l'association entre le B3 et la dilatation de l'oreillette gauche, l'hypertrophie du ventricule gauche, l'hypertrophie de la paroi postérieure et l'hypertrophie du septum interventriculaire respectivement.

	Effectifs	Pourcentages
Type		
Tiraillement	35	58,3
Fourmillement	29	48,3
Picotement	25	41,7
Décharges électriques	22	36,7
Brûlure	21	35,0
Etau/ Ecrasement	11	18,3
Piqûre	10	16,6
Siège		
Colonne lombaire	57	95,0
Colonne thoracique	54	90,0
Trapèze supérieur	38	63,3
Régions occipitales	37	61,7
Genoux	35	58,3
Crêtes tibiales	33	55,0
Styloïdes radiales	29	48,3
Fourchette sternale	25	41,7
Régions péri malléolaires	22	36,7
Creux xyphoïdien	21	35,0
Epicondyles latérales	17	28,3
Styloïdes ulnaires	16	26,7
Grands trochanters	15	25,0
Sus épineux	13	21,7
Régions fessières	11	18,3
Olécrânes	11	18,3

Tableau 1 : Caractéristiques générales de la population

Variables n =50	n (%)
Genre	
Féminin	27 (54)
Masculin	23 (46)
Âge (année)	
21— 40	2 (4)
41— 60	18 (36)
61 — 80	26 (52)
> 80	4 (8)
Motifs de consultation	
Dyspnée à l'effort intense	17 (34)
Dyspnée à l'effort modéré	28 (56)
Dyspnée de repos	5 (10)
Stade de l'IC à la découverte (NYHA)	
Stade I	10 (20)
Stade II	23 (46)
Stade III	11 (22)
Stade IV	6 (12)
FRCV associés*	
Hypertension artérielle	26 (52)
Obésité	14 (28)
Alcoolisme	8 (16)
Tabagisme	4 (8)
Diabète	3 (6)

*Un participant peut avoir plusieurs FRCV ; NYHA : New York Heart Association ; FRCV : Facteurs de Risque Cardio-Vasculaires

Tableau 2 : Anomalies à l'auscultation cardiaque

Variables (n=50)	n (%)
Anomalies cardiaques*	
Souffles cardiaques	18 (36)
Troisième bruit cardiaque (B3)	13 (26)
Quatrième bruit cardiaque (B4)	4 (8)
Localisation des souffles cardiaques**	
Tricuspide	12 (24)
Mitrale	10 (20)
Erb	10 (20)
Aortique	8 (16)
Pulmonaire	6 (12)

*Chaque anomalie est analysée exclusivement

**Un patient pouvait avoir un souffle cardiaque ayant plusieurs localisations.

Tableau 3 : Anomalies retrouvées à l'échographie cardiaque

Variabes (n=50)	n (%)
Dilatation de l'oreillette gauche	28 (56)
Fraction d'éjection ventriculaire gauche réduite	24 (48)
Hypertrophie du ventricule gauche	18 (36)
Hypertrophie du septum inter ventriculaire	17 (34)
Hypertrophie de la paroi postérieure	17 (34)

**Chaque anomalie est analysée exclusivement*

La présence du B3 était associée de manière statistiquement significative aux anomalies suivantes retrouvées à l'échographie cardiaque (tableau 4), à savoir : la réduction de la fraction d'éjection du ventricule gauche (OR=5,4 IC 95% [1,28-23,37], p=0,01) et l'hypertrophie du ventricule gauche (OR=4,3 IC 95% [1,14-16,37], p=0,04).

Tableau 4 : Associations entre le B3 et les anomalies retrouvées à l'échographie cardiaque

Variabes n (%)	B3		OR [95 % CI] ; p
	Présent	Absent	
Fraction d'éjection du ventricule gauche			
Réduite	10 (41,7)	14 (58,3)	5,4 [1,28-23,37] ; 0,01
Conservée	3 (11,5)	23 (88,5)	
Diamètre du ventricule gauche			
Hypertrophique	8 (44,4)	10 (55,6)	4,3 [1,14-16,37] ; 0,04
Normal	5 (15,6)	27 (84,4)	
Surface de l'oreillette gauche			
Dilatée	9 (32,1)	19 (67,9)	2,1 [0,55-8,16] ; 0,26
Normale	4 (20)	18 (80)	
Septum interventriculaire			
Hypertrophique	4 (23,5)	13 (76,5)	0,82 [0,21-3,18] ; 0,99
Normal	9 (27,3)	24 (72,7)	
Paroi postérieure			
Hypertrophique	2 (11,8)	15 (88,2)	0,26 [0,05-1,37] ; 0,17
Normale	11 (33,3)	22 (66,7)	

DISCUSSION ET CONCLUSION

Malgré les progrès en imagerie médicale comme l'utilisation des ultrasons pour le suivi paraclinique des pathologies cardiaques, l'IC reste une pathologie dont le suivi n'est pas aisé dans notre contexte. Ceci est dû : au manque de personnel qualifié notamment en périphérie d'une part et à l'inaccessibilité de l'échographie cardiaque à cause des coûts élevés d'achat des appareils et de réalisation d'examen aux patients d'autre part [3, 29–31].

Ce travail avait pour but de déterminer l'association qui existerait entre le B3 et les anomalies structurelles et fonctionnelles perçues à l'échographie cardiaque. Une telle association peut être utile pour montrer l'intérêt d'un suivi basé sur des caractéristiques cliniques (auscultation des bruits du cœur) des patients ayant une insuffisance cardiaque dans des contextes où il manque d'équipement et de personnel [22]. Dans cette étude, une association statistiquement significative a été retrouvée entre la présence du B3 et les anomalies retrouvées à l'échographie du cœur telles que la réduction de la fraction d'éjection du ventricule gauche et l'hypertrophie du ventricule gauche. Ces résultats montrent que chez les patients souffrant d'une insuffisance cardiaque, la présence du B3 au cours de l'auscultation clinique peut être considérée comme un facteur prédictif de la présence de ces deux anomalies fonctionnelles et structurelles à l'échographie cardiaque [32]. En effet, le B3 est un bruit diastolique anormal du cœur qui correspond à la phase initiale rapide de remplissage ventriculaire [33]. Il est associé aux anomalies

hémodynamiques qui sous-tendent l'insuffisance cardiaque [22]. Sa valeur sémiologique lors d'une auscultation cardiaque est considérable [34, 35]. Il traduit, soit une augmentation de la pression auriculaire gauche, soit une dysfonction systolique du ventricule gauche.

L'introduction du numérique dans la pratique de l'auscultation offre de nombreuses possibilités liées aux fonctionnalités telles que le traitement, l'enregistrement, le stockage, l'annotation et le partage des sonorités cardiaques. Dans cette étude, le traitement des enregistrements (amplification et filtrage) a permis d'analyser de manière précise les sonorités cardiaques et de procéder à leur annotation (description détaillée). Le stockage de ces sonorités cardiaques annotées dans une BDAA constitue un support pour le développement d'un outil d'aide à la décision clinique [36–38]. Il constitue également un support pédagogique. Des sonorités cardiaques issues de vrais patients pourraient ainsi être mises à la disposition des apprenants sous différents formats (simulateurs, logiciels d'apprentissage, etc.) pour soutenir leur apprentissage de l'auscultation cardiaque [38, 39].

CONFLITS D'INTERETS

Les auteurs ne déclarent aucun conflit d'intérêts.

Contribution des auteurs

Georges Bediang a participé à la conception et à la conduite de l'étude ainsi qu'à la rédaction de l'article. Chris Nganou-Gnindjio a participé à la conception de l'étude et à la collecte des données. Jean Jacques Yomkil Baye a participé à la collecte des données et à la rédaction de l'article. Goethe-Doualla Fred Cyrille a participé à la rédaction de l'article. Jacqueline Ze Minkande a participé à la conception de l'article. Tous les auteurs ont relu et accepté la version finale de l'article.

REMERCIEMENTS

Nous remercions les Hôpitaux Universitaires de Genève qui ont financé la réalisation des échographies cardiaques dans le cadre de cette étude.

REFERENCES

- [1] Hess OM. Insuffisance cardiaque : définition, étiologies et classifications. *Forum Méd Suisse* 2003; 3: 1158–1163.
- [2] Slivnick J, Lampert BC. Hypertension and Heart Failure. *Heart Fail Clin* 2019; 15: 531–541.
- [3] Rohacek M, Burkard T. Heart failure in Africa. *Praxis* 2019; 108: 983–990.
- [4] Malik A, Brito D, Chhabra L. Congestive Heart Failure (CHF). In: *StatPearls*. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing, <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/book> s/NBK430873/ (2019, accessed 19 January 2020).
- [5] Olivier G. Épidémiologie de l'insuffisance cardiaque. *Vaisseaux, Cœur, Poumons* 2009 ; 3-5.
- [6] Pio M, Afassinou Y, Pessinaba S, et al. Epidémiologie et étiologies des insuffisances cardiaques à Lomé. *Pan Afr Med J*; 18.
- [7] Kingue S, Dzudie A, Menanga A, et al. Nouveau regard sur l'insuffisance cardiaque chronique de l'adulte en Afrique à l'ère de l'échocardiographie Doppler : expérience du service de médecine de l'Hôpital Général de Yaoundé. *Annales de Cardiologie et d'Angéiologie* 2005; 54(5): 276-283
- [8] Wong C, Chen S, Iyngkaran P. Cardiac Imaging in Heart Failure with Comorbidities. *Curr Cardiol Rev* 2017; 13: 63–75.
- [9] Bloomfield GS, Barasa FA, Doll JA, et al. Heart Failure in Sub-Saharan Africa. *Curr Cardiol Rev* 2013; 9: 157–173.
- [10] Rangayyan RM, Lehner RJ. Phonocardiogram signal analysis: a review. *Crit Rev Biomed Eng* 1987; 15: 211–236.
- [11] Durand LG, Blanchard M, Cloutier G, et al. Comparison of pattern recognition methods for computer-assisted classification of spectra of heart sounds in patients with a porcine bioprosthetic valve implanted in the mitral position. *IEEE Trans Biomed Eng* 1990; 37: 1121–1129.
- [12] Durand L-G, Guo Z, Sabbah HN, et al. Comparison of spectral techniques for computer-assisted classification of spectra of heart sounds in patients with porcine

- bioprosthetic valves. *Med Biol Eng Comput* 1993; 31: 229–236.
- [13] Durand L-G, Pibarot P. Digital Signal Processing of the Phonocardiogram: Review of the Most Recent Advancements. *Crit Rev Biomed Eng*; 23. Epub ahead of print 1995. DOI: 10.1615/CritRevBiomedEng.v23.i3-4.10.
- [14] Sarbandi RR, Doyle JD, Navidbakhsh M, et al. A color spectrographic phonocardiography (CSP) applied to the detection and characterization of heart murmurs: preliminary results. *Biomed Eng OnLine* 2011; 10: 42.
- [15] Kingue S, Angandji P, Menanga AP, et al. Efficiency of an intervention package for arterial hypertension comprising telemanagement in a Cameroonian rural setting: The TELEMED-CAM study. *Pan Afr Med J*; 15. Epub ahead of print 29 2013. DOI: 10.11604/pamj.2013.15.153.2655.
- [16] OMS | Cameroun. *WHO*, <http://www.who.int/workforcealliance/countries/cmr/fr/> (accessed 15 November 2017).
- [17] Chao C-T, Maneetien N, Wang C-J, et al. Performance Evaluation of Heart Sound Cancellation in FPGA Hardware Implementation for Electronic Stethoscope. *Sci World J*; 2014.
- [18] Høyte H, Jensen T, Gjesdal K. Cardiac auscultation training of medical students: a comparison of electronic sensor-based and acoustic stethoscopes. *BMC Med Educ* 2005; 5: 14.
- [19] Lukin A, Polić S, Rumboldt Z, et al. [Comparison of auscultation findings using a classic stethoscope (Litmann 2120) and electronically amplified stethoscope (Medmax2)]. *Lijec Vjesn* 1996; 118: 127–128.
- [20] Lakhe A, Sodhi I, Warriar J, et al. Development of digital stethoscope for telemedicine. *J Med Eng Technol* 2016; 40: 20–24.
- [21] Meziani F, Debbal SM, Atbi A. Analysis of the pathological severity degree of aortic stenosis (AS) and mitral stenosis (MS) using the discrete wavelet transform (DWT). *J Med Eng Technol* 2013; 37: 61–74.
- [22] Zuber M, Kipfer P, Attenhofer Jost C. Systolic dysfunction: correlation of acoustic cardiography with Doppler echocardiography. *Congest Heart Fail Greenwich Conn* 2006; 12 Suppl 1: 14–18.
- [23] Littmann Stethoscopes. https://www.littmann.com/3M/en_US/littmann-stethoscopes/ (accessed 12 January 2020)
- [24] Audacity ® | Free, open source, cross-platform audio software for multi-track recording and editing., <https://www.audacityteam.org/> (accessed 12 January 2020).
- [25] Foyers d'auscultation cardiaque - Recherche Google [Internet]. Disponible sur: <https://www.google.com/search>.
- [26] Redfield MM. Heart Failure with Preserved Ejection Fraction. *N Engl J Med* 2016; 375: 1868–1877.
- [27] Fedele F, Mancone M, Adamo F, et al. Heart Failure With Preserved, Mid-Range, and Reduced Ejection Fraction: The Misleading Definition of the New Guidelines. *Cardiol Rev* 2017; 25: 4–5.
- [28] Kirkpatrick JN, Vannan MA, Narula J, et al. Echocardiography in Heart Failure. *J Am Coll Cardiol* 2007; 50: 381–396.

- [29] Carlson S, Duber HC, Achan J, et al. Capacity for diagnosis and treatment of heart failure in sub-Saharan Africa. *Heart* 2017; 103: 1874–1879.
- [30] Cameron A, Ewen M, Ross-Degnan D, et al. Medicine prices, availability, and affordability in 36 developing and middle-income countries: a secondary analysis. *The Lancet* 2009; 373: 240–249.
- [31] Rohde LE, Biolo A. The tip of the iceberg in the sub-Saharan Africa: Unraveling the real world in the diagnosis and treatment of heart failure. *Heart* 2017; 103: 1842–1843.
- [32] Mehta NJ, Khan IA. Third heart sound: genesis and clinical importance. *Int J Cardiol* 2004; 97: 183–186.
- [33] Stefadouros MA. The Cause and Clinical Significance of Diastolic Heart Sounds. *Arch Intern Med* 1980; 140: 537.
- [34] Marcus GM. Association Between Phonocardiographic Third and Fourth Heart Sounds and Objective Measures of Left Ventricular Function. *JAMA* 2005; 293: 2238.
- [35] Patel R, Bushnell DL, Sobotka PA. Implications of an audible third heart sound in evaluating cardiac function. *West J Med* 1993; 158: 606–609.
- [36] Liu C, Springer D, Li Q, et al. An open access database for the evaluation of heart sound algorithms. *Physiol Meas* 2016; 37: 2181–2213.
- [37] De Lima FH, Coimbra MT, Da Silva S. A survey of audio processing algorithms for digital stethoscopes. *Heal 2009 - Proc 2nd Int Conf Health Inform* 2009; 425–429.
- [38] Pereira D, Hedayioglu F, Correia R, et al. DigiScope - Unobtrusive collection and annotating of auscultations in real hospital environments. *Proc Annu Int Conf IEEE Eng Med Biol Soc EMBS* 2011; 1193–1196.
- [39] Barrett MJ, Mackie AS, Finley JP. Cardiac Auscultation in the Modern Era. *Cardiol Rev* 2017; 25: 205–210.