

Les dispositifs intelligents et l'IA en cardiologie peuvent-ils améliorer la pratique clinique?

Dr NICCOLO MAURIZI^a, Dr IOANNIS SKALIDIS^a, Dre DENISE AUBERSON^a, Dr THABO MAHENDIRAN^{a,b},
Dr STEPHANE FOURNIER^a, Pr EMMANUEL ABBE^c et Pr OLIVIER MULLER^a

Rev Med Suisse 2023; 19: 1041-6 | DOI: 10.53738/REVMED.2023.19.828.1041

Le monitoring à distance devient de plus en plus populaire parmi les praticiens de la santé pour le diagnostic et la surveillance des maladies cardiaques. Plusieurs dispositifs «intelligents» et connectés aux smartphones ont été développés et validés durant ces dernières années, mais leur utilisation clinique est toujours limitée. Bien que les progrès de l'intelligence artificielle (IA) soient en train de révolutionner plusieurs domaines, l'impact que ces innovations pourront avoir dans le monde médical est toujours inconnu. Le but de cet article est de passer en revue les principaux dispositifs disponibles et de comprendre les applications actuelles de l'IA en cardiologie, afin de mieux saisir dans quelle mesure ils sont susceptibles de transformer notre pratique clinique quotidienne.

Can smart devices and AI in cardiology improve clinical practice?

Remote monitoring is becoming increasingly popular among health-care professionals and patients for diagnosing and treating heart disease. Several smart devices connected to smartphones have been developed and validated in recent years, but their clinical use is still limited. Significant advances in the field of artificial intelligence (AI) are also revolutionizing several fields, yet the impact that these innovations could have on routine clinical practice is still unknown. We review the evidence and uses of the main smart devices currently available as well as the latest applications of AI in the field of cardiology, with the aim to ultimately evaluate the potential of this technology to transform modern clinical practice.

INTRODUCTION

La santé digitale et la télémédecine ont fleuri pendant la pandémie récente et modifié la façon traditionnelle d'interaction physique entre le patient et le médecin par l'utilisation de moyens digitaux et internet. La surveillance à distance et ambulatoire devient de plus en plus populaire parmi les praticiens de la santé et les patients pour la surveillance et le diagnostic continu à long terme des maladies cardiaques.¹ Les progrès sur les plans du matériel et du logiciel ont conduit

au développement de nouveaux dispositifs à la fois pratiques et abordables, permettant la surveillance des populations vulnérables depuis le confort de leur domicile, tout en fournissant des alertes critiques pour les événements nécessitant une attention médicale rapide ou une hospitalisation.² Alors que la technologie est devenue essentielle à la médecine cardiovasculaire et que l'intelligence artificielle (IA) ouvre des possibilités dans plusieurs domaines, la contribution de cette technologie à l'amélioration de la pratique quotidienne est inconnue de la plupart des cliniciens. Dans cet article, nous examinons les preuves actuelles concernant les appareils digitaux et l'IA en cardiologie et voyons comment et quand ils peuvent nous aider dans la façon dont nous traitons les patients.

QUELS SONT LES DISPOSITIFS «INTELLIGENTS» ET POURQUOI SONT-ILS UTILISÉS?

Les cardiologues utilisent de plus en plus la technologie pour fournir des solutions de diagnostic et de suivi à distance, en partie grâce à des dispositifs implantables ou portables. Ces derniers permettent la détection précoce d'événements physiologiques critiques, donnant aux patients plus de temps pour demander une aide médicale.²

La plupart des preuves dans la littérature sont liées à des dispositifs connectés à un smartphone, capables de générer et parfois d'interpréter un ECG professionnel.¹ Ces dispositifs peuvent être divisés en capteurs portables (wearable) ayant le potentiel de fournir des informations de surveillance et de diagnostic critiques des paramètres physiologiques, et en dispositifs capables d'enregistrer un ECG professionnel sur demande.

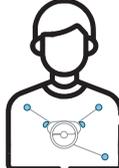
De nombreux dispositifs portables ont été introduits pour la surveillance cardiaque à distance et à long terme, mais parmi eux, les montres connectées sont les plus étudiées et validées. La technologie utilisée est la photopléthysmographie (PPG), qui utilise des faisceaux lumineux pour détecter les changements de volume sanguin passant par le poignet. L'intervalle «pic à pic» entre les pulsations peut être interprété comme l'intervalle R-R cardiaque,³ et si incorporé à un algorithme, il peut détecter la fibrillation auriculaire (FA) (figure 1). L'Apple Watch, comparée aux enregistreurs sous-cutanés implantables, a démontré une sensibilité de 87% et une spécificité de 97% pour identifier les patients atteints de FA silencieuse.⁴ La montre Google a aussi des performances similaires, avec une

^aService de cardiologie, Centre hospitalier universitaire vaudois, 1011 Lausanne, ^bLaboratoire Mathematical Data Science, École polytechnique fédérale de Lausanne, 1015 Lausanne, ^cLaboratoire Mathematical Data Science et LTS4, École polytechnique fédérale de Lausanne, 1015 Lausanne

niccolo.maurizi@chuv.ch | ioannis.skalidis@chuv.ch | denise.auberson@chuv.ch
thabo.mahendiran@epfl.ch | stephane.fournier@chuv.ch | emmanuel.abbe@epfl.ch
olivier.muller@chuv.ch

FIG 1 Caractéristiques techniques des dispositifs ECG pour smartphone

La figure présente les dispositifs validés et disponibles sur le marché suisse.

<p>Apple Watch</p>  <p>Intermittent smartwatch ECG initiated by semi-continuous photoplethysmogram</p> <p>ECG à 1 dérivation (DII)</p>	<p>Cardiosecur</p>  <p>On demand ECG à 4 dérivations</p> <p>Reconstruction à 15 dérivation avec système frank leads</p>	<p>Alivecor</p>  <p>On demand ECG à 1 et 6 dérivations</p> <p>Mesure d'un ECG à 1 dérivation (DII) ou à 6 dérivation (périphérique et augmentée)</p>
<p>Samsung Watch</p>  <p>Intermittent smartwatch ECG initiated by semi-continuous photoplethysmogram</p> <p>ECG à 1 dérivation (DII)</p>	<p>D-Heart</p>  <p>On demand ECG à 8 et 12 dérivation</p> <p>ECG 12 dérivation standard. Mesure par mouvement des électrodes précordiales</p>	<p>Qardiocore</p>  <p>Enregistrement ECG continu jusqu'à 3 heures</p> <p>ECG à 1 dérivation (DII)</p>

sensibilité de 88% et une spécificité de 81% dans l'identification des patients atteints de FA silencieuse (figure 2).⁵ Ces preuves ont conduit à la recommandation de la Société européenne de cardiologie de proposer ces dispositifs pour le dépistage de la FA (classe d'évidence I, niveau B).⁶

Une autre classe de dispositifs est capable d'enregistrer un ECG professionnel sur demande avec l'aide d'un smartphone. Parmi ceux-ci, Alivecor est un ECG portable capable d'enregistrer un tracé à 1 ou 6 dérivation en utilisant les doigts ou le contact de certaines parties du corps.⁷ Il a été validé pour le dépistage de la FA asymptomatique,⁷ la surveillance post-ablation d'une FA,⁸ le diagnostic de la FA dans les accidents vasculaires cérébraux cryptogéniques⁹ et la détection automatique de l'hyperkaliémie.¹⁰ D-Heart est un ECG professionnel basé sur un smartphone capable d'enregistrer un tracé à 8 ou 12 dérivation à l'aide d'électrodes standards (figure 1). L'application guide l'utilisateur au placement correct des électrodes sur le thorax grâce à un algorithme d'«image processing» (traitement d'image) lié à la caméra du smartphone.¹¹ Il a été validé pour le dépistage ECG de masse d'une population saine et de patients avec maladies cardiaques,¹¹⁻¹³ la surveillance à domicile des patients à risque¹⁴ cardiaque et l'utilisation dans un cabinet médical (figure 2).¹⁵

Cardiosecur est un ECG de smartphone à 4 dérivation utilisant des électrodes standards qui permet de reconstruire un ECG à 15 dérivation (en utilisant la méthode de Frank),

tandis que Qardiocore est un ECG à 1 dérivation capable de surveillance continue (figure 1). Il n'existe aucune validation de cas d'utilisation, ces dispositifs ont seulement été validés en termes de précision par rapport à l'ECG standard à 12 dérivation (figure 2).

Enfin, l'introduction de métavers en médecine cardiovasculaire, qui représente la convergence d'un environnement virtuel en ligne immersif interconnecté dans lequel les participants interagissent avec du contenu 3D et des avatars, a été proposée.¹⁶ Le «CardioVerse» a le potentiel d'améliorer la pratique médicale de multiples façons. En premier lieu, en tant que plateforme de télémédecine universelle, mais aussi pour entraîner les patients à la réalité virtuelle ainsi que pour aider les cardiologues interventionnels dans la planification des interventions grâce à la visualisation 3D augmentée des structures cardiaques (figure 3).¹⁶ Récemment, un essai de faisabilité a été réalisé concernant l'utilisation de métavers en tant que plateforme de télécardiologie pour le diagnostic précoce et la surveillance des patients cardiaques,¹⁷ permettant l'identification d'un patient atteint d'angine de Prinzmetal. De plus, via un programme d'entraînement en réalité virtuelle dédié dans le métavers, des patients présentant une claustrophobie limitante ont pu effectuer pour la première fois une résonance magnétique cardiaque.¹⁸ Cependant, malgré l'enthousiasme mondial concernant le métavers, ses applications en matière de soins de santé et de médecine cardiovasculaire sont encore limitées à quelques projets et des données

FIG 2 Indication d'utilisation clinique des dispositifs ECG pour smartphone

La figure présente les dispositifs actuellement disponibles sur le marché suisse.

<p>Apple Watch</p>  <p>Validé pour :</p> <p>Diagnostic de la FA</p> <p>Sensibilité de 87 % et spécificité de 97 % dans l'identification des patients atteints de fibrillation auriculaire silencieuse</p>	<p>Cardiosecur</p>  <p>Validé pour :</p> <p>Comparaison avec l'électrocardiographe standard</p>	<p>Alivecor</p>  <p>Validé pour :</p> <p>Dépistage de la FA asymptomatique Surveillance postablation de la FA Diagnostic de la FA dans les accidents vasculaires cérébraux cryptogéniques Détection de l'hyperkaliémie</p>
<p>Samsung Watch</p>  <p>Validé pour :</p> <p>Diagnostic de la FA</p> <p>Sensibilité de 88 % et spécificité de 81 % dans l'identification des patients atteints de fibrillation auriculaire silencieuse</p>	<p>D-Heart</p>  <p>Validé pour :</p> <p>Dépistage de masse de la population Surveillance à domicile pour les patients à risque Utilisation dans un cabinet médical</p>	<p>Qardiocore</p>  <p>Validé pour :</p> <p>Comparaison avec électrocardiographe standard</p>

supplémentaires sont nécessaires pour calibrer sa mise en pratique clinique.¹⁹

L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE PEUT-ELLE AIDER LE CARDIOLOGUE?

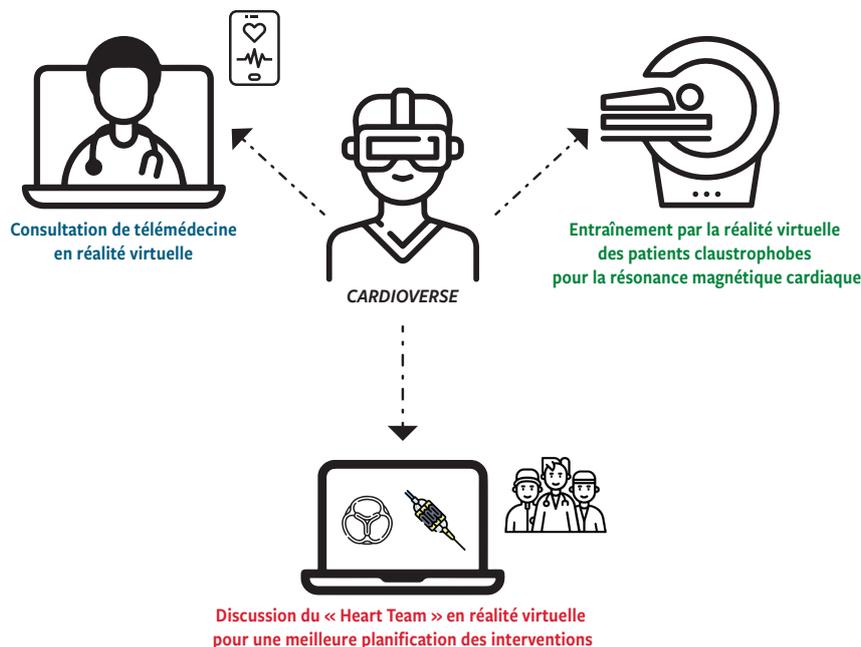
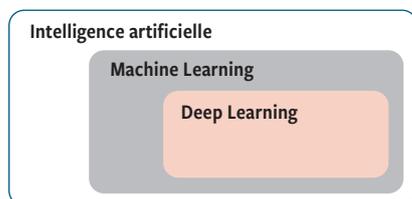
L'IA fait usage de l'ingénierie et de l'informatique pour produire une intelligence qui simule ou complète l'intelligence humaine. L'apprentissage automatique (machine learning (ML)) représente pour sa part le cerveau de l'IA, avec le développement d'algorithmes qui exploitent les données et s'améliorent automatiquement avec l'expérience.²⁰

Quant au deep learning (DL), il s'agit d'une technique d'apprentissage automatique spécifique, basée sur des réseaux de neurones artificiels entraînés à large échelle (figure 4).²¹ La puissance de l'IA réside dans sa capacité à extraire des informations utiles de données complexes et potentiellement massives, parfois bien au-delà de ce qui est possible pour les cliniciens humains. Grâce à cette capacité, l'IA a le potentiel d'aider les cliniciens dans le diagnostic, le traitement et la prévention des maladies. Ci-après, nous présentons un résumé des applications récentes de l'IA à l'échocardiographie et à la détection et évaluation de la maladie coronarienne.

IA ET MALADIE CORONARIENNE

Bien qu'il existe divers exemples d'application de l'IA dans le domaine de la maladie coronarienne (MC), cette partie va se concentrer sur les applications récentes de l'IA et, en particulier, sur deux modalités d'imagerie coronarienne: la coronarographie invasive (ICA) et la tomодensitométrie (CT) cardiaque.

L'ICA reste l'investigation «gold standard» pour l'évaluation de la MC. Lors d'une ICA, le cardiologue procède généralement à une évaluation visuelle de la sévérité anatomique d'une sténose coronarienne. Cependant, ces évaluations visuelles sont sujettes à une importante variabilité inter et même intraopérateur,²² motivant ainsi le développement de la coronarographie quantitative (QCA) pour une quantification plus précise et reproductible du degré de sténose.²² La segmentation des artères coronaires à partir des images d'ICA est la première étape clé de la QCA. À cet égard, plusieurs études ont proposé des méthodes robustes pour la segmentation des artères coronaires en utilisant des modèles de DL,^{23,24} qui est également capable de localiser, segmenter et calculer le pourcentage de sténoses,²⁵ et même de détecter le type de lésion.²⁶ Plus récemment, la faisabilité de la détection en temps réel des sténoses coronariennes a même été démontrée.²⁷

FIG 3 Applications actuelles du «CardioVerse» en pratique clinique**FIG 4** Aperçu de l'intelligence artificielle

Cependant, l'évaluation anatomique n'est pas la seule utilisée dans l'appréciation d'une sténose; les mesures hémodynamiques jouent un rôle important dans l'évaluation des sténoses anatomiquement intermédiaires, comme la fraction de réserve de débit (Fractional Flow Reserve: FFR). Dans cette optique, un algorithme de ML a démontré sa capacité à classifier la FFR ($\leq 0,80$ vs $> 0,80$), basé sur des caractéristiques cliniques et angiographiques calculées depuis les images d'ICA.²⁸

En outre, nous avons récemment publié la première étude démontrant la capacité du DL à prédire la survenue d'un infarctus depuis les images d'ICA. En utilisant une cohorte de patients ayant subi une ICA pour un infarctus, chez qui une ICA antérieure avait été réalisée dans les 5 ans, notre modèle de DL a surpassé l'évaluation visuelle humaine et les paramètres angiographiques établis (par exemple, diamètre de la sténose) dans la prédiction de la lésion responsable de l'infarctus futur (figure 5).²⁹⁻³¹

Les applications de l'IA dans le domaine du CT coronaire sont déjà relativement avancées. Une approche de ML pour la quantification rapide et automatisée du score de calcification des artères coronaires (CAC) à partir du CT sans contraste a donné des résultats prometteurs.³² De plus, des études, inté-

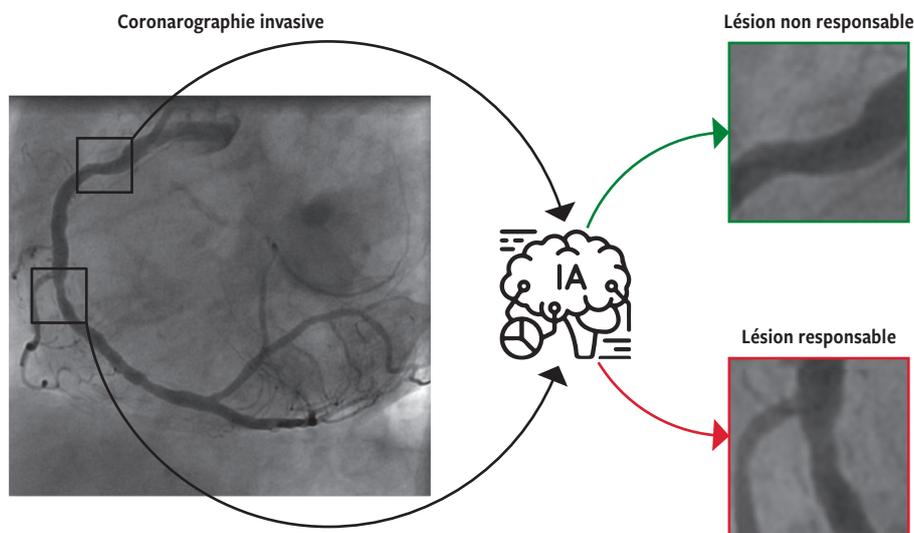
grant les données CAC avec d'autres variables cliniques en utilisant un modèle de ML, ont aussi démontré une valeur ajoutée dans la stratification du risque coronaire.^{33,34} Une étude a également présenté un algorithme de DL capable de générer automatiquement des mesures du tissu adipeux épicaudique (EAT) (un marqueur pronostique dans la MC) en moins de 30 secondes.³⁵

L'IA a également été employée pour stratifier le risque des plaques athérosclérotiques, en utilisant un grand nombre de caractéristiques du CT coronaire avec contraste (CTCA). Un modèle de ML a réussi à identifier des lésions athérosclérotiques à risque, avec une performance surpassant l'évaluation visuelle.³⁶ Un modèle de ML a également été capable de prédire des événements indésirables en combinant les données cliniques et du CCTA.³⁷

Au-delà de l'évaluation coronaire, l'IA a récemment été appliquée afin de détecter et quantifier du tissu adipeux péri-coronaire (PCAT) (marqueur de l'inflammation coronaire), et prédire le risque de survenue d'un événement cardiovasculaire.³⁸ De plus, comme avec l'ICA, l'IA a été également utilisée pour prédire la présence d'une lésion hémodynamiquement significative (tel que décrit plus haut),³⁹ et même la lésion coupable dans une cohorte de patients présentant un syndrome coronarien aigu évalué par CTCA.⁴⁰

IA ET ÉCHOCARDIOGRAPHIE

L'échographie cardiaque (EC) est la modalité d'imagerie de première ligne pour le dépistage et la surveillance des cardiopathies et valvulopathies. Des outils d'IA ont été développés pour optimiser l'acquisition d'images ou en automatiser l'interprétation, concernant les fonctions systolique et dias-

FIG 5 IA pour prédire la lésion responsable d'un infarctus à partir de la coronarographie


tolique et la présence de cardiomyopathie ou de valvulopathie. L'interprétation de l'EC dépend fortement de la qualité des images acquises et de l'expérience de l'opérateur. Des logiciels basés sur le DL proposent une aide pendant l'acquisition pour optimiser la qualité de l'examen.⁴¹ Lorsqu'utilisée par un personnel médical non spécialisé en cardiologie, la qualité d'image guidée par l'IA a été jugée comme étant de qualité diagnostique dans > 90% des cas.⁴¹ La fraction d'éjection ventriculaire gauche (FEVG) est estimée ou calculée en traçant manuellement le bord de l'endocarde en systole et en diastole, avec une possible variabilité inter et intraobservateur. Le calcul automatisé de la FEVG par un algorithme de ML a montré moins de variabilité, avec une bonne correspondance avec la FEVG déterminée par trois cardiologues ($r = 0,95$ ($p < 0,001$; IC: 0,938-0,960)).⁴² De multiples paramètres échocardiographiques sont intégrés dans un algorithme diagnostique de la dysfonction diastolique (DD) et des pressions de remplissage élevées. Or, la corrélation avec les mesures invasives des pressions de remplissage n'est que modeste.⁴³ Des modèles de «Deep Neural Network» ont identifié des phénotypes de patients à risque de DD, avec une meilleure corrélation aux pressions de remplissage.⁴⁴ Enfin, un modèle de DL a pu identifier des valvulopathies mitrale et aortique avec une haute précision sur classification et analyse automatiques de vues d'EC et des flux valvulaires ($AUC > 0,88$).⁴⁵ L'utilisation de l'IA en EC est en plein essor, et déjà utilisé sous forme de logiciels commercialisés pour l'acquisition et l'analyse d'images. La force de l'IA naît de la capacité d'analyse des pixels supérieure à l'œil. De futurs modèles d'IA pourraient faire un apprentissage non supervisé des EC, permettant à l'algorithme de déterminer seul les critères diagnostiques importants.

CONCLUSION

Notre pratique clinique est de plus en plus liée à l'utilisation des dernières avancées. Les dispositifs diagnostiques basés sur des smartphones ont démontré la possibilité d'améliorer

l'identification de certaines arythmies fréquentes et asymptomatiques,⁷⁻⁹ ainsi que la possibilité de réaliser des ECG professionnels plus rapidement et dans un milieu non hospitalier.¹¹⁻¹⁵ Quant à l'IA, elle a le potentiel de révolutionner le domaine du diagnostic de la maladie coronarienne (MC). Son utilisation lors d'une coronarographie va permettre prochainement un traitement plus rapide et plus efficace. De plus, les technologies de l'IA peuvent aider à la prévention de la MC en identifiant les patients ou les lésions à haut risque, particulièrement en utilisant les images du CT coronaire.

Bien que les avantages de l'IA et des dispositifs «intelligents» dans le domaine médical soient encore en cours d'évaluation et qu'il faille davantage valider et interpréter les fonctionnements des algorithmes utilisés par l'IA, il est clair que cette technologie a le potentiel de transformer la manière dont nous diagnostiquons, traitons et prévenons les maladies cardiovasculaires.

Conflit d'intérêts: N. Maurizi est actionnaire minoritaire de la start-up à vocation sociale D-Heart. Les autres auteurs n'ont déclaré aucun conflit d'intérêts en relation avec cet article.

IMPLICATIONS PRATIQUES

- Les dispositifs diagnostiques basés sur des smartphones ont démontré la possibilité d'améliorer l'identification de certaines arythmies fréquentes et asymptomatiques, ainsi que de réaliser des ECG professionnels plus rapidement et dans un milieu non hospitalier.
- L'intelligence artificielle (IA) a le potentiel de révolutionner le domaine du diagnostic de la maladie coronarienne (MC).
- Son utilisation lors d'une coronarographie va permettre prochainement un traitement plus rapide et plus efficace.
- De plus, les technologies de l'IA peuvent aider à la prévention de la MC en identifiant les patients ou les lésions à haut risque, particulièrement en utilisant les images du CT coronaire.

STRATÉGIE DE RECHERCHE DANS PUBMED

Une recherche systématique a été effectuée sur PubMed avec les mots-clés suivants: 'Digital ECG devices', 'Smartwatch', 'Artificial Intelligence Cardiology', 'Artificial intelligence Coronary artery disease', 'Artificial intelligence Echocardiography'.

- Sana F, Isselbacher EM, Singh JP et al. Wearable Devices for Ambulatory Cardiac Monitoring: JACC State-of-the-Art Review. *J Am Coll Cardiol.* 2020 Apr 7;75(13):1582-1592. DOI: 10.1016/j.jacc.2020.01.046.
- Kuehn BM. Telemedicine Helps Cardiologists Extend Their Reach. *Circulation.* 2016 Oct 18;134(16):1189-91.
- Carpenter A, Frontera A. Smart-watches: a potential challenger to the implantable loop recorder? *Europace.* 2016 Jun;18(6):791-3.
- Isakdze N, Martin SS. How useful is the smartwatch ECG? *Trends Cardiovasc Med.* 2020 Oct;30(7):442-8. DOI: 10.1016/j.tcm.2019.10.010.
- Wasserlauf J, You C, Patel R, et al. Smartwatch Performance for the Detection and Quantification of Atrial Fibrillation. *Circ Arrhythm Electrophysiol.* 2019 Jun;12(6):e006834.
- Hindricks G, Potpara T, Dagres N, et al. 2020 ESC Guidelines for the diagnosis and management of atrial fibrillation developed in collaboration with the European Association for Cardio-Thoracic Surgery (EACTS): The Task Force for the diagnosis and management of atrial fibrillation of the European Society of Cardiology (ESC) Developed with the special contribution of the European Heart Rhythm Association (EHRA) of the ESC. *Eur Heart J.* 2021 Feb 1;42(5):373-498.
- Halcox J, Wareham K, Cardew A, et al. Assessment of Remote Heart Rhythm Sampling Using the AliveCor Heart Monitor to Screen for Atrial Fibrillation: The REHEARSE-AF Study. *Circulation.* 2017 Nov 7;136(19):1784-94.
- Lubitz SA, Atlas SJ, Ashburner JM, et al. Screening for Atrial Fibrillation in Older Adults at Primary Care Visits: VITAL-AF Randomized Controlled Trial. *Circulation.* 2022 Mar 29;145(13):946-54.
- Koh KT, Law WC, Zaw WM, et al. Smartphone electrocardiogram for detecting atrial fibrillation after a cerebral ischaemic event: a multicentre randomized controlled trial. *Europace.* 2021 Jul 18;23(7):1016-23.
- Galloway CD, Valys AV, Shreibati JB, et al. Development and Validation of a Deep-Learning Model to Screen for Hyperkalemia From the Electrocardiogram. *JAMA Cardiol.* 2019 May 1;4(5):428-36.
- Maurizi N, Fumagalli C, Skalidis I, et al. Validation of a multiple-lead smartphone-based electrocardiograph with automated lead placement for layman use in patients with hypertrophic cardiomyopathy. *J Electrocardiol.* 2023 Mar 5;79:1-7. DOI: 10.1016/j.jelectrocard.2023.02.006.
- Maurizi N, Faragli A, Imberti J, et al. Cardiovascular screening in low-income settings using a novel 4-lead smartphone-based electrocardiograph (D-Heart®). *Int J Cardiol.* 2017 Jun 1;236:249-52. DOI: 10.1016/j.ijcard.2017.02.027.
- Maurizi N, Fumagalli C, Skalidis I, et al. Layman electrocardiographic screening using smartphone-based multiple-lead ECG device in school children. *Int J Cardiol.* 2023 Feb 15;373:142-4. DOI: 10.1016/j.ijcard.2022.12.017.
- Maurizi N, Fumagalli C, Cecchi F, Olivetto I. Use of Smartphone-operated ECG for home ECG surveillance in COVID-19 patients. *Eur Heart J-Dig Health* 2021;2(1):175-8.
- Spinicci M, Fumagalli C, Maurizi N, et al. Feasibility of a Combined Mobile-Health Electrocardiographic and Rapid Diagnostic Test Screening for Chagas-Related Cardiac Alterations. *Microorganisms.* 2021 Sep 6;9(9):1889. DOI: 10.3390/microorganisms9091889.
- Skalidis I, Fournier S, Noirclerc N, et al. Consultation in the CardioVerse: The doctor will see your avatar now. *Trends Cardiovasc Med.* 2022 Jul 21;S1050-1738(22)00108-6. DOI: 10.1016/j.tcm.2022.07.005.
- Skalidis I, Muller O, Fournier S, et al. Feasibility of Using the Metaverse as Telecardiology Platform: Remote Follow-up of a Patient With Vasospastic Angina. *Can J Cardiol.* 2022 Nov;38(11):1768-9. DOI: 10.1016/j.cjca.2022.07.020.
- Skalidis I, Muller O, Fournier S. CardioVerse: The cardiovascular medicine in the era of Metaverse. *Trends Cardiovasc Med.* 2022 May 11;S1050-1738(22)00071-8.
- Skalidis I, Fournier S, Skalidis E, Maurizi N. Virtual hospitals and digital doctors: how far are we from the CardioVerse? *Eur Heart J.* 2023 Jan 1;44(1):7-9. DOI: 10.1093/eurheartj/ehac603.
- Mitchell TM. *Machine learning.* New York: McGraw-Hill, 1997.
- Deo RC. Machine Learning in Medicine. *Circulation.* 2015 Nov 17;132(20):1920-30.
- Shah R, Yow E, Jones WS, et al. Comparison of visual assessment of coronary stenosis with independent quantitative coronary angiography: Findings from the Prospective Multicenter Imaging Study for Evaluation of Chest Pain (PROMISE) trial. *American Heart Journal* 2017;184:1-9.
- Yang S, Kweon J, Roh JH, et al. Deep learning segmentation of major vessels in X-ray coronary angiography. *Sci Rep.* 2019 Nov 15;9(1):16897. DOI: 10.1038/s41598-019-53254-7.
- Iyer K, Najarian CP, Fattah AA, et al. AngioNet: a convolutional neural network for vessel segmentation in X-ray angiography. *Sci Rep.* 2021 Sep 10;11(1):18066.
- Ovalle-Magallanes E, Avina-Cervantes JG, Cruz-Aceves I, Ruiz-Pinales J. Transfer Learning for Stenosis Detection in X-ray Coronary Angiography. *Mathematics (Basel)* 2020;8(9):1510.
- Du T, Xie L, Zhang H, et al. Training and validation of a deep learning architecture for the automatic analysis of coronary angiography. *EuroIntervention.* 2021 May 17;17(1):32-40. DOI: 10.4244/EIJ-D-20-00570.
- Danilov VV, Klyshnikov KY, Gernet OM, et al. Real-time coronary artery stenosis detection based on modern neural networks. *Sci Rep.* 2021 Apr 7;11(1):7582.
- Cho H, Lee J, Kang S, et al. Angiography Based Machine Learning for Predicting Fractional Flow Reserve in Intermediate Coronary Artery Lesions. *J Am Heart Assoc.* 2019 Feb 19;8(4):e011685. DOI: 10.1161/JAHA.118.011685.
- Mahendiran T, Thanou D, Senouf O, et al. Deep learning-based prediction of future myocardial infarction using invasive coronary angiography: a feasibility study. *Open Heart.* 2023 Jan;10(1):e002237.
- Thanou D, Senouf OY, Raita O, et al. Predicting future myocardial infarction from angiographies with deep learning. *Medical Images meets NeurIPS 2021 [En ligne].* Disponible sur: infoscience.epfl.ch/record/290001/files/MedNeurIPS21_camera_ready.pdf
- Sievering ID, Senouf OY, Mahendiran T, et al. Anatomy-informed multimodal learning for myocardial infarction prediction. *Medical Images meets NeurIPS 2022.*
- Volterink JM, Leiner T, Takx RAP, Viergever MA, Isgum I. Automatic Coronary Calcium Scoring in Non-Contrast-Enhanced ECG-Triggered Cardiac CT With Ambiguity Detection. *IEEE Trans Med Imaging.* 2015 Sep;34(9):1867-78.
- Al'Aref SJ, Maliakal G, Singh G, et al. Machine learning of clinical variables and coronary artery calcium scoring for the prediction of obstructive coronary artery disease on coronary computed tomography angiography: analysis from the CONFIRM registry. *Eur Heart J.* 2020 Jan 14;41(3):359-67.
- Nakanishi R, Slomka PJ, Rios R, et al. Machine Learning Adds to Clinical and CAC Assessments in Predicting 10-Year CHD and CVD Deaths. *JACC Cardiovasc Imaging.* 2021 Mar;14(3):615-25.
- Eisenberg E, McElhinney PA, Commandeur F, et al. Deep Learning-Based Quantification of Epicardial Adipose Tissue Volume and Attenuation Predicts Major Adverse Cardiovascular Events in Asymptomatic Subjects. *Circ Cardiovasc Imaging.* 2020 Feb;13(2):e009829.
- Kolossváry M, Karády J, Kikuchi Y, et al. Radiomics versus Visual and Histogram-based Assessment to Identify Atheromatous Lesions at Coronary CT Angiography: An Ex Vivo Study. *Radiology.* 2019 Oct;293(1):89-96.
- Motwani M, Dey D, Berman DS, et al. Machine learning for prediction of all-cause mortality in patients with suspected coronary artery disease: a 5-year multicentre prospective registry analysis. *Eur Heart J.* 2017 Feb 14;38(7):500-7.
- Oikonomou EK, Williams MC, Kotanidis CP, et al. A novel machine learning-derived radiotranscriptomic signature of perivascular fat improves cardiac risk prediction using coronary CT angiography. *Eur Heart J.* 2019 Nov 14;40(43):3529-43.
- Dey D, Gaur S, Ovrehus KA, et al. Integrated prediction of lesion-specific ischaemia from quantitative coronary CT angiography using machine learning: a multicentre study. *Eur Radiol.* 2018 Jun;28(6):2655-64.
- Al'Aref SJ, Singh G, Choi JW, et al. A Boosted Ensemble Algorithm for Determination of Plaque Stability in High-Risk Patients on Coronary CTA. *JACC Cardiovasc Imaging.* 2020 Oct;13(10):2162-73.
- Narang A, Bae R, Hong H, et al. Utility of a Deep-Learning Algorithm to Guide Novices to Acquire Echocardiograms for Limited Diagnostic Use. *JAMA Cardiol.* 2021 Jun 1;6(6):624-32. DOI: 10.1001/jamacardio.2021.0185.
- Asch FM, Poilvert N, Abraham T, et al. Automated Echocardiographic Quantification of Left Ventricular Ejection Fraction Without Volume Measurements Using a Machine Learning Algorithm Mimicking a Human Expert. *Circ Cardiovasc Imaging.* 2019 Sep;12(9):e009303.
- Lancellotti P, Galderisi M, Edvardsson T, et al. Echo-Doppler estimation of left ventricular filling pressure: results of the multicentre EACVI Euro-Filling study. *Eur Heart J Cardiovasc Imaging.* 2017 Sep 1;18(9):961-8. DOI: 10.1093/ehjci/ehx067.
- Pandey A, Kagiya N, Yamamala N, et al. Deep-Learning Models for the Echocardiographic Assessment of Diastolic Dysfunction. *J Am Coll Cardiol Img.* 2021 Oct;14(10):1887-900. DOI: 10.1016/j.jcmg.2021.04.010.
- Yang F, Chen X, Lin X, et al. Automated Analysis of Doppler Echocardiographic Videos as a Screening Tool for Valvular Heart Diseases. *J Am Coll Cardiol Img.* 2022 Apr;15(4):551-63.