

ECG et intelligence artificielle : les nouvelles dérivations



L. Fiorina

Artificial intelligence and the electrocardiogram: New leads

L. Fiorina^a
A. Cinq-Mars^{a,b}

^aRamsay Santé, institut cardiovasculaire Paris Sud, hôpital privé Jacques-Cartier, 6, avenue du Noyer-Lambert, 91300 Massy, France

^bInstitut universitaire de cardiologie et de pneumologie de Québec (IUCPQ), 2725, chemin Ste-Foy, Québec, QC, G1V 4G5, Canada

Disponible en ligne sur ScienceDirect le 13 février 2025

L'electrocardiogramme (ECG) est depuis plus d'un siècle un outil central au diagnostic clinique en médecine et plus particulièrement en cardiologie. Simple, accessible et standardisé, il a transformé la pratique clinique en permettant la détection précoce de pathologies cardiovasculaires structurales et électriques. Historiquement, l'interprétation de l'ECG repose sur l'expertise humaine, ce qui la rend subjective et vulnérable aux variations d'expérience et de formation. Avec l'émergence de l'intelligence artificielle (IA), propulsée par des avancées dans les réseaux neuronaux profonds (DNN), une nouvelle ère d'innovation s'ouvre à la cardiologie. Les réseaux neuronaux profonds, inspirés des processus biologiques du cerveau humain, permettent l'apprentissage et l'identification de schémas complexes à l'intérieur de vastes volumes de données. Aujourd'hui, plusieurs groupes à travers le monde disposent de vastes bases de données ECG numériques liées à des ensembles de données cliniques, révélant ainsi l'utilité de l'intelligence artificielle pour identifier des signatures et des schémas inaccessibles par l'interprétation ECG conventionnelle. La démonstration qu'un algorithme basé sur les réseaux neuronaux profonds pouvait surpasser l'expertise d'un cardiologue dans l'interprétation d'un ECG n'est plus à faire [1,2].

Dans les dernières années, un nombre exponentiel de publications a vu le jour et les études de développement laissent de plus en plus de place aux études de validation externe et de faisabilité réelle en milieu clinique de manière prospective. De ce fait, il se dessine un changement de paradigme auquel la

cardiologie moderne sera confrontée, soit l'acceptation de l'enrichissement de la pratique médicale par l'intégration de l'intelligence artificielle tout en considérant l'impact des défis qui y sont attachés. Actuellement, des modèles d'intelligence artificielle ont été développés pour l'aide à l'interprétation basique de l'ECG 12 dérivations de repos et du Holter ECG, mais ils permettent également d'aller au-delà de ce que l'œil humain, même expert, peut déceler. Ainsi, la détermination de cardiopathie structurale parfois invisible en échographie, le dépistage de troubles ioniques et même la prédiction de fibrillation atriale ou tachycardie ventriculaire alors que l'ECG paraît normal (Fig. 1) [3]. Les termes de biomarqueur digital et de AI-ECG sont de plus en plus utilisés pour décrire un algorithme d'intelligence artificielle qui va donner à partir d'un ECG une probabilité de pathologie associée ou d'évènement rythmique futur, présentant ainsi les nouvelles dérivations de l'ECG. Parallèlement aux publications scientifiques, de nombreuses entreprises et start-ups ont développé et commercialisé des outils permettant d'analyser des ECG avec les dernières technologies d'intelligence artificielle, permettant l'utilisation en pratique clinique. La première au monde ayant eu une homologation FDA en 2017 ainsi qu'un marquage C.E. étant Cardiologs, une start-up française [4].

Ce manuscrit explore les contributions de l'intelligence artificielle à l'interprétation de l'ECG, son potentiel pour prédire les risques de survenues d'évènements ainsi que les perspectives d'incorporation dans l'ère de la cardiologie moderne.

Auteur correspondant :

L. Fiorina,
Ramsay Santé, institut
cardiovasculaire Paris Sud, hôpital
privé Jacques-Cartier, 6, avenue
du Noyer-Lambert, 91300 Massy,
France.
Adresse e-mail :
laurent_fiorina@yahoo.fr

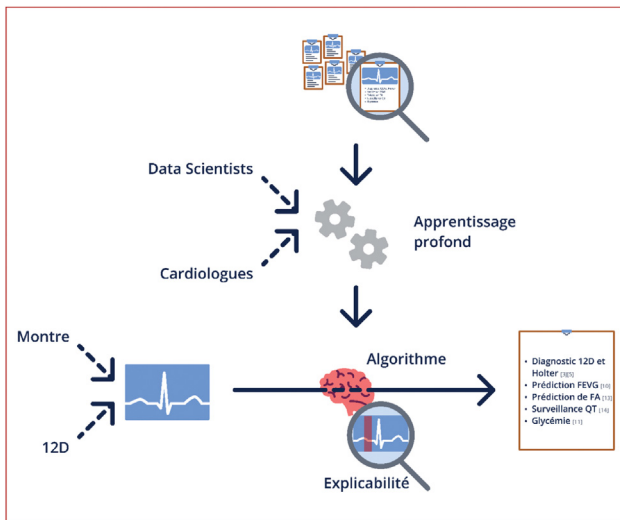


Figure 1. Algorithme de Deep Neural Network (DNN) pour l'ECG (illustration Gautier Zimmermann).

INTELLIGENCE ARTIFICIELLE ET INTERPRÉTATION DE L'ECG : GAIN DE TEMPS, GAIN D'EXPERTISE ET DÉCOUVERTE DE POTENTIELS CACHÉS

Pour bien des cardiologues, la médecine moderne est une médecine d'efficacité sans compromis sur la performance et l'approche centrée sur le patient. À cet effet, l'ECG enrichi par l'intelligence artificielle présente plusieurs avantages cliniques évidents.

Dans la première étude d'envergure parue dans *Nature*, Hanun et al. [1] ont comparé le diagnostic des principales arythmies de 91 232 ECG (1 dérivation) par 6 cardiologues avec celle d'un algorithme de DL et montré la supériorité de ce dernier. On peut noter que les performances de l'algorithme étaient ici certes impressionnantes mais comparées à des cardiologues dont la « sensibilité » pour détecter une arythmie était limitée (fibrillation atriale à 71 %, bloc auriculo-ventriculaire à 73 %, tachycardie ventriculaire à 65 %).

En automatisant l'interprétation initiale, les systèmes IA-ECG peuvent libérer un temps précieux pour les cliniciens. Chow et al. ont démontré qu'un algorithme basé sur l'intelligence artificielle pouvait analyser des ECG à une vitesse exponentielle par rapport à une lecture humaine [5]. La performance et l'efficacité des algorithmes ont aussi été développées pour les plateformes d'analyse de monitoring prolongé (Holter), démontrant sa supériorité par rapport à l'utilisation conventionnelle en diminuant de plus de 25 % le temps total nécessaire à l'analyse et en étant plus précis dans le diagnostic de fibrillation atriale et de tachycardie ventriculaire [4]. D'autres algorithmes ont été développés dans l'objectif d'orienter rapidement le patient en situation d'urgence. Par exemple, l'équipe de PMcardio a développé une application mobile composée d'un algorithme d'interprétation d'ECG enrichi par l'intelligence artificielle à partir d'une photo d'un tracé ECG 12 dérivations conventionnels (Fig. 2). Le modèle justifie en quelques secondes le plan de soins approprié pour le patient, notamment dans le cadre d'une occlusion coronaire [3], permettant ainsi de déployer les ressources nécessaires pour les patients qui en ont besoin.

Parmi les applications cliniques de détection de maladie de la sphère cardiovasculaire à partir d'un ECG 12D, on retrouve la cardiomyopathie hypertrophique, l'amyloïdose cardiaque, l'hypertension pulmonaire, l'insuffisance cardiaque à fraction d'éjection préservée ou abaissée, le syndrome du long QT avec catégorisation LQT1, 2 ou 3, le statut des pressions de remplissage ventriculaire gauche, les valvulopathies, les

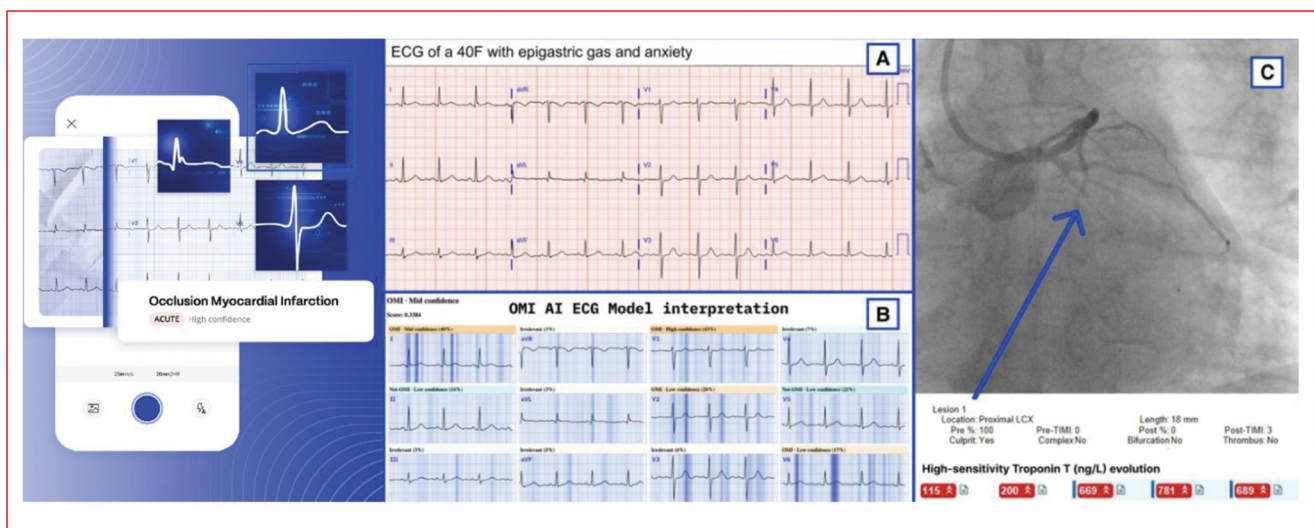


Figure 2. Application mobile PM Cardio avec modèle d'intelligence artificielle permettant d'obtenir une interprétation de l'ECG et également le diagnostic d'occlusion coronaire (indépendamment des critères classiques STEMI).

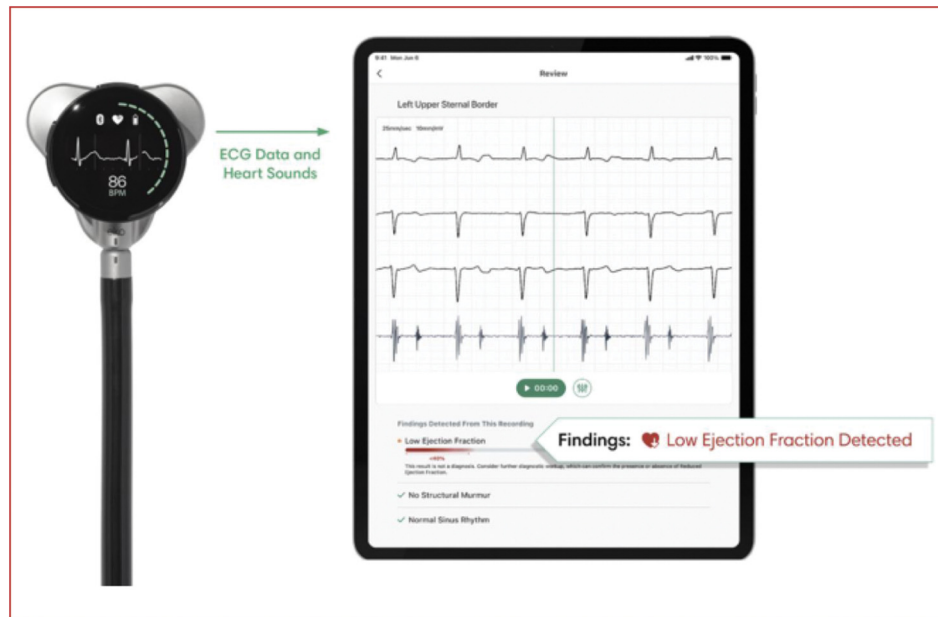


Figure 3. Stéthoscope digital Eko Health's CORE 500 digital permettant l'enregistrement simultané d'un phonogramme et d'un ECG (3 électrodes disposées autour de la membrane du stéthoscope). Le model d'intelligence artificielle donne une indication de suspicion de fraction d'éjection ventriculaire gauche inférieure à 40 %. Les résultats sont visibles simultanément sur l'application mobile.

anomalies régionales de la contractilité et la fibrillation auriculaire [3,6].

Atia et al. ont réussi à entraîner un algorithme de DL pour prédire une fraction d'éjection ventriculaire gauche basse (< 35 %) à partir d'une base d'apprentissage de 44 959 patients de la Mayo Clinic où à chaque ECG 12D correspondait une échographie. Cet algorithme a été validé par de nombreuses études par la suite et même adapté à un ECG 1 dérivation [3,7]. Fait intéressant, il a aussi été démontré dans certaines pathologies (sténose aortique ou insuffisance cardiaque à fraction d'éjection réduite par exemple), que les patients identifiés comme positifs par un modèle d'intelligence artificielle, mais ne présentant pas la maladie au moment de l'étude, étaient significativement plus susceptibles d'évoluer vers la maladie au cours du suivi par rapport à ceux identifiés comme négatifs par l'algorithme [7,8]. Des éléments subtils de l'ECG, déterminant d'une maladie myocardique seraient donc perceptibles à un stade précoce par l'intelligence artificielle avant même que cela soit décelable en échographie, ouvrant la voie à des prises en charge précoces.

D'autres algorithmes ont également été développés pour étendre le spectre du diagnostic de manière moins intuitive, tels que la détection de l'anémie, le syndrome d'apnée du sommeil ou encore les troubles électrolytiques (hyperkaliémie). Ces avancées redéfinissent les possibilités du dépistage à l'échelle populationnelle et la mise en place de stratégies de dépistage et de soins optimisées.

Aussi, certains modèles démontrent d'excellentes performances pour le diagnostic et l'interprétation des ECG à une seule dérivation fournis par les dispositifs portables dotés de

capteurs ECG comme les SmartWatches-ECG (montres connectées disposant d'un enregistreur ECG). Ces outils, actuellement principalement orientés vers la détection de fibrillation atriale, offrent des perspectives de *screening* et de surveillance continue à grande échelle, mais peuvent faire craindre un « déluge » de données difficiles à gérer pour les cliniciens. Un algorithme basé sur un réseau neuronal profond a démontré ses performances pour le diagnostic de la fibrillation atriale, surpassant l'algorithme de l'Apple Watch [9], montrant également la pertinence quant à la diminution des faux positifs et des diagnostics non concluants en octroyant des données précises, rapidement exploitables par les professionnels de santé.

L'essor de cette technologie a permis le développement d'autres algorithmes novateurs dont celui de l'équipe de Maille et al., qui a démontré que la durée du QTc mesurée automatiquement par un ECG de montre connectée assisté par l'intelligence artificielle montre une concordance raisonnable avec les mesures manuelles réalisées sur un ECG 12D conventionnel [10].

INTELLIGENCE ARTIFICIELLE POUR PRÉDIRE L'AVENIR : STRATIFICATION DES RISQUES ET PRÉDICTION DES ÉVÉNEMENTS

L'intelligence artificielle peut donc « prédire » une condition à un instant « T » mais également une pathologie à venir pour

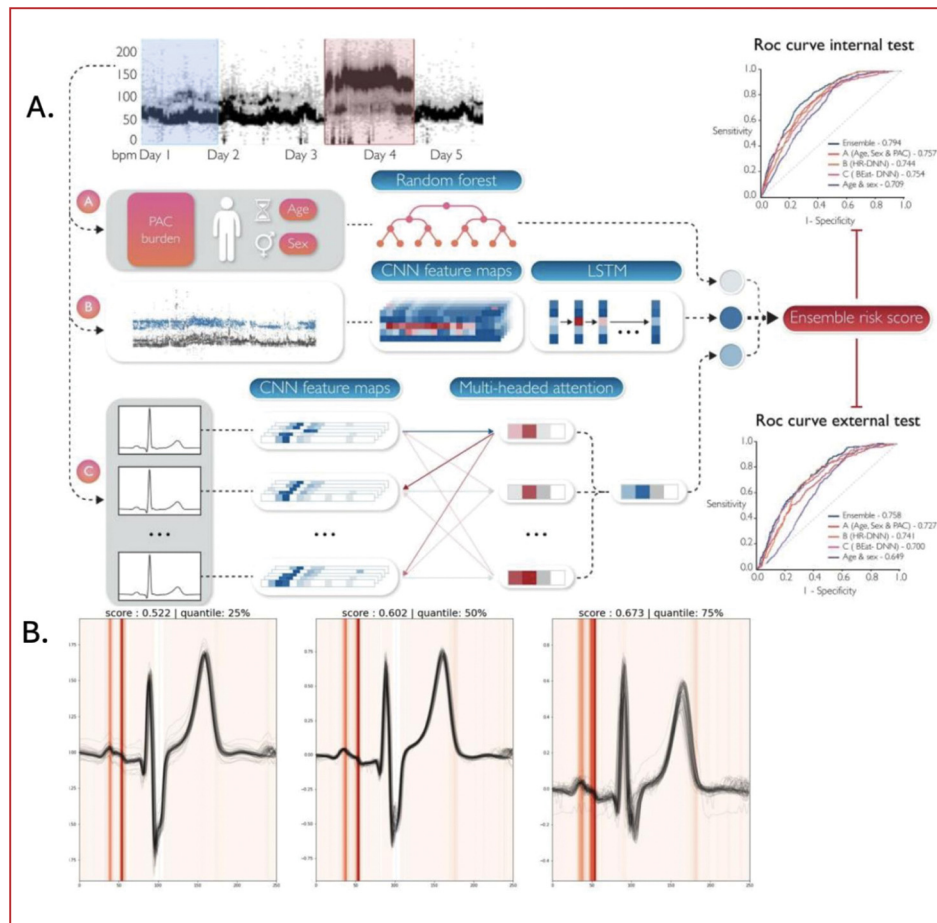


Figure 4. Modèle de prédiction de fibrillation atriale en rythme sinusal. A. Les premières 24 h d'un Holter servent à générer des données pour le modèle, tandis que les 14 jours suivants permettent d'attribuer une étiquette. (A) L'âge, le sexe et la charge d'extrasystoles atriales sur 24 h sont analysés (*random forest*) pour prédire un score (B) Un réseau neuronal convolucional extrait des caractéristiques de tracé et de fréquence cardiaque, permettant d'obtenir un score. (C) Le Holter est divisé en séquences de 80 battements, analysées individuellement par un réseau convolucional, puis une couche d'attention identifie les relations entre battements pour produire un score moyen. Ces scores sont intégrés dans une régression logistique pour générer un score final de risque [14]. B. Saliency Map montrant en rouge les zones ayant déterminé le model d'intelligence artificielle pour la prédiction de fibrillation atriale en rythme sinusal.

peu de disposer de données suffisantes avec un suivi longitudinal et que la pathologie s'y prête.

C'est ce qu'ont montré Raghunath et al. [3] en entraînant un réseau de neurones sur 1,6 millions d'ECG de 430 000 patients suivis entre 1984 et 2019, le principe étant de prévoir à partir d'un ECG 12D sinusal si le patient développera de la fibrillation atriale à 1 an. Il en résulte une prédiction avec une sensibilité et spécificité de 69 et 81 %. On devine les applications possibles d'un tel algorithme que ce soit dans le *screening* ou dans le bilan post-accident vasculaire cérébral.

Le modèle de Singh et al. a démontré lui, la capacité d'un algorithme à prédire la survenue de fibrillation atriale à court terme en utilisant un ECG 1 dérivation de 24 h en rythme sinusal [10].

Pour ce qui est de la stratification du risque, plusieurs modèles ont démontré leurs supériorités aux calculateurs traditionnels

pour prédire le risque d'événements cardiovasculaires, notamment le risque de mortalité. En 2024, l'équipe de Lin et al. [11] a conduit la première étude clinique randomisée multicentrique évaluant avec un critère de mortalité l'utilité d'un ECG assisté par l'intelligence artificielle. Il s'agissait d'identifier parmi des patients hospitalisés ($n = 15\,965$) ceux présentant un risque élevé de mortalité. L'intervention basée sur les alertes IA-ECG comprenait un rapport généré par l'intelligence artificielle et des messages d'avertissement adressés aux médecins, signalant les patients prédits comme étant à haut risque de mortalité. L'étude a démontré que la mise en œuvre des alertes IA-ECG était associée à une réduction significative de la mortalité toutes causes confondues dans les 90 jours. Dans le domaine de la prévention de la mort subite, des équipes ont travaillé au développement de modèles capables de prédire la survenue de tachycardie ventriculaire ou de fibrillation ventriculaire à court terme comme à plus long terme

(Fiorina L, et al. Sustained ventricular tachycardias: short-term prediction applying deep learning to single-lead ambulatory ECG. *European Heart Journal*. In press).

Enfin, parmi les progrès récents, on peut citer la détection des pressions de remplissage ventriculaire gauche à partir d'ECG standard est particulièrement prometteuse, la détermination précoce d'augmentation des pressions de remplissage permettant de prédire et éventuellement prévenir des épisodes cliniques potentiellement catastrophiques d'insuffisance cardiaque [12].

UTILISATION PRATIQUE ET PERSPECTIVES

L'avenir de l'IA-ECG repose sur des progrès technologiques et organisationnels qui permettront une adoption clinique large sécurisée et éthique.

Certains outils sont d'ores et déjà disponibles sur le marché, comme par exemple la plateforme Cardiologs pour l'analyse du Holter et de l'ECG 12D, ou le stéthoscope-ECG Eko enrichi par l'intelligence artificielle. Ce dernier produit associe un ECG et un phonogramme à partir de l'auscultation cardiaque conventionnelle puis interprète les données pour être ensuite transmis au clinicien sur une application mobile (Fig. 3), avec une identification des patients à haut risque d'avoir une fraction d'éjection ventriculaire gauche inférieure à 40 %, utilisant pour cela un algorithme initialement développé par la Mayo Clinic [7].

Les biais algorithmiques, souvent introduits lors du développement des modèles, constituent un défi majeur. Ces biais peuvent provenir de la sous-représentation de certaines populations dans les bases de données d'entraînement, ce qui entraîne des prédictions moins précises pour ces groupes. Par exemple, des modèles formés principalement sur des patients d'origine européenne peuvent être moins performants pour les patients issus d'origines ethniques différentes. L'élimination de ces biais passe par une diversification des données d'entraînement et une validation systématique dans des populations hétérogènes [13]. L'intégration de l'intelligence artificielle dans les workflows médicaux nécessite une validation rigoureuse pour assurer sa fiabilité et minimiser les faux positifs, qui peuvent surcharger les systèmes de santé.

Enfin, apporter des éléments d'explicabilité semble revêtir une importance particulière auprès de nombreux praticiens et pourrait conditionner l'adoption. Tout un pan de l'intelligence artificielle s'est donc développé pour tenter d'expliquer ce qui détermine les algorithmes. Cela peut revêtir la forme de carte de saillance (« saliency map »). On trouvera par exemple dans l'étude de Singh et al. [14] sur la prédiction de fibrillation atriale une représentation de l'ECG avec des lignes rouges qui indiquent l'onde P lorsqu'elle est large ou biphasique ainsi que la fin de l'onde T (Fig. 4), ce qui a déterminé le modèle à prédire la fibrillation atriale en se basant sur les milliers d'exemples ayant servi à son entraînement.

Les modèles actuels d'intelligence artificielle ont été développés pour l'aide à l'interprétation de l'ECG 12 dérivations de repos et du Holter ECG.

CONCLUSION

L'intelligence artificielle appliquée à l'ECG transforme un outil centenaire en nouvel instrument performant pour la prédiction et le diagnostic des maladies cardiovasculaires et au-delà. Avec des preuves cliniques et des applications en pleine expansion, l'IA-ECG est déjà en train de révolutionner la cardiologie moderne et deviendra bientôt un outil incontournable, accélérant dans le même élan la numérisation et le partage de données à des fins d'amélioration des soins. Son succès à venir passera par une synergie entre le corps médical et les experts en technologies pour trouver les meilleures applications, répondre aux besoins cliniques et continuer de prouver son impact positif.

Déclaration de liens d'intérêts

Laurent Fiorina est Directeur médical de l'intelligence artificielle chez Philips.

A. Cinq-Mars déclare ne pas avoir de liens d'intérêts.

RÉFÉRENCES

- [1] Hannun AY, Rajpurkar P, Haghighpanahi M, et al. Cardiologist-level arrhythmia detection and classification in ambulatory electrocardiograms using a deep neural network. *Nat Med* 2019;25:65–9.
- [2] Ribeiro AH, Ribeiro MH, Paixão GMM, et al. Automatic diagnosis of the 12-lead ECG using a deep neural network. *Nat Commun* 2020;11:1760.
- [3] Ose B, Sattar Z, Gupta A, et al. Artificial intelligence interpretation of the electrocardiogram: a state-of-the-art review. *Curr Cardiol Rep* 2024;26:561–80.
- [4] Fiorina L, Maupain C, Gardella C, et al. Evaluation of an ambulatory ECG analysis platform using deep neural networks in routine clinical practice. *J Am Heart Assoc* 2022;11:e026196.
- [5] Chow BJW, Fayyazif N, Balamane S, et al. Interpreting wide-complex tachycardia with the use of artificial intelligence. *Can J Cardiol* 2024;40:1965–73.
- [6] Siontis KC, Noseworthy PA, Attia ZI, et al. Artificial intelligence-enhanced electrocardiography in cardiovascular disease management. *Nat Rev Cardiol* 2021;18:465–78.
- [7] Attia ZI, Kapa S, Lopez-Jimenez F, et al. Screening for cardiac contractile dysfunction using an artificial intelligence-enabled electrocardiogram. *Nat Med* 2019;25:70–4.
- [8] Cohen-Shelly M, Attia ZI, Friedman PA, et al. Electrocardiogram screening for aortic valve stenosis using artificial intelligence. *Eur Heart J* 2021;42:2885–96.
- [9] Fiorina L, Chemaly P, Cellier J, et al. Artificial intelligence-based electrocardiogram analysis improves atrial arrhythmia detection from a smartwatch electrocardiogram. *Eur Heart J Digit Health* 2024;5:535–41.
- [10] Maille B, Wilkin M, Million M, et al. Smartwatch electrocardiogram and artificial intelligence for assessing cardiac-rhythm safety of drug therapy in the COVID-19 Pandemic. The QT-logs study. *Int J Cardiol* 2021;331:333–9.
- [11] Lin CS, Liu WT, Tsai DJ, et al. AI-enabled electrocardiography alert intervention and all-cause mortality: a pragmatic randomized clinical trial. *Nat Med* 2024;30:1461–70.
- [12] Lee E, Ito S, Miranda WR, et al. Artificial intelligence-enabled ECG for left ventricular diastolic function and filling pressure. *NPJ Digit Med* 2024;7:4.



- [13] Chin MH, Afsar-Manesh N, Bierman AS, et al. Guiding principles to address the impact of algorithm bias on racial and ethnic disparities in health and health care. *JAMA Netw Open* 2023;6: e2345050.
- [14] Singh JP, Fontanarava J, de Massé G, Carbonati T, Li J, Henry C, et al. Short-term prediction of atrial fibrillation from ambulatory monitoring ECG using a deep neural network. *Eur Heart J Digit Health* 2022;3:208–17.