

Un rapport exprime une prise de position officielle de l'Académie nationale de médecine.
L'Académie dans sa séance du mardi 3 octobre 2023, a adopté le texte de ce rapport par 62 voix pour, 3 voix contre et 10 abstentions.

Intelligence artificielle appliquée à la rythmologie cardiaque **Perspectives et propositions** *Artificial intelligence in cardiac Arrhythmology*

Rapporteurs SAOUDI N. et JULIEN H.
Commissions VIII et V

Groupe de travail : Intelligence artificielle et rythmologie cardiaque

Au nom du groupe de travail comprenant madame et messieurs
BRINGUER Jacques, DESNOS Michel, DOROBANTU Maria, HAUET Thierry, KOMAJDA
Michel, NORDLINGER Bernard, OURABAH Rissane, SERRIE Alain.

Résumé

Le recueil numérisé de l'activité électrique myocardique autorise son analyse par Intelligence Artificielle (IA) à partir de trois sources que sont les outils d'intervention en rythmologie, les registres de la mort subite et les dispositifs médicaux connectés.

Le traitement des arythmies atriales fait appel à l'IA afin d'identifier les zones de rotors ou de fibrose arythmogène dans le but d'améliorer la qualité de l'ablation de la fibrillation atriale (FA). La création, à partir de données d'imagerie, d'une chambre ventriculaire virtuelle personnalisée, permet à l'IA de guider l'ablation et d'évaluer le pronostic.

Lors des morts subites, c'est moins l'analyse des données de l'activité électrique myocardique et de la délivrance du choc électrique salvateur que celle des données de santé de la population dans son ensemble, qui pourraient contribuer à identifier les meilleurs prédicteurs de risque.

Les données recueillies lors d'examens électrocardiographiques banaux ou par les objets portables, dont les « montres connectées », permettent grâce à l'IA de prédire la survenue ultérieure ou la récurrence de troubles du rythme. L'IA est aussi omniprésente dans l'analyse de l'électrocardiogramme en rythme sinusal permettant d'en tirer des conclusions dépassant largement son utilisation habituelle.

L'utilisation de ces données ne va pas sans soulever des problèmes éthiques et juridiques qui sont encore incomplètement réglés. L'appropriation en rythmologie cardiaque de l'outil nouveau qu'est l'IA suggère aux médecins rythmologues d'approfondir leurs connaissances mathématiques et d'intégrer les propositions des apprentissages automatiques et profonds dans leur démarche diagnostique et thérapeutique.

Summary

The digital collection of the myocardial electrical activity has allowed its analysis by artificial intelligence (AI) using three sources: interventional arrhythmology, sudden death registries, and connected devices.

Atrial arrhythmia management uses AI to identify regions of rotors or arrhythmogenic fibrosis to improve AF ablation. At the ventricular level personal virtual chamber creation incorporating imaging data allows AI to guide the ablation and identify the prognostic risk.

As far as sudden death is concerned, the data collected during the acute event or shock delivery are not as pertinent as the global population's health data in order to predict the best risk predictors.

Data from the surface ECG or wearable devices including smart watches using AI allow AF identification or recurrence prediction. AI applied to the surface ECG in sinus rhythm yields a considerable amount of information far beyond its routine use.

Using these data paved the way for ethical and legal problems which are currently incompletely solved. The appropriation in cardiac arrhythmology of the new tool of AI suggests a bigger training in mathematics of the arrhythmologists, and to be able to incorporate machine learning in their diagnostic and therapeutic practices.

Mots clefs

Intelligence artificielle, arythmie, fibrillation atriale, mort subite, apprentissage automatique, apprentissage machine, apprentissage profond, réseaux neuronaux.

Key words

Artificial intelligence, arrhythmias, atrial fibrillation, sudden death, machine learning, deep learning, neural network.

Les auteurs de ce rapport n'ont aucun lien d'intérêt avec le sujet.

Matériel et méthodes

Le groupe de travail s'est réuni en présentiel dans les locaux de l'Académie nationale de médecine et en distanciel en cas d'impossibilité. Huit séances d'audition ont été réalisées en présentiel, regroupant des spécialistes mathématiciens, ingénieurs, entrepreneurs, cardiologues-rythmologues, anesthésistes-réanimateurs, spécialistes d'éthique et industriels ayant tous effectué des recherches ou utilisant l'intelligence artificielle (IA) dans le domaine de la rythmologie¹.

¹ Ont été auditionnés et sont remerciés

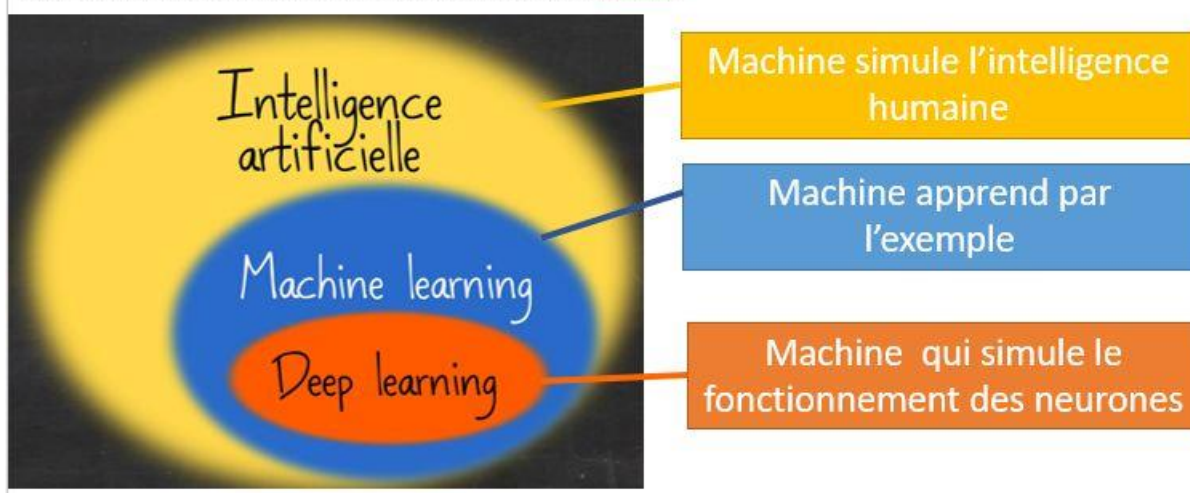
Mme Nesrine BENYAHIA	Docteure en droit public, fondatrice de DrData.
Mr Thomas DUONG	Directeur Juridique, Health Data Hub.
Mr Yann FLEUREAU	Fondateur et PDG de Cardiologs.
Pr Jean-Gabriel GANASCIA	Sorbonne Université, Directeur de l'équipe ACASA du LIP6.
Mr Martin de GOURCUFF	Ingénieur ; Société Withings.
Pr Pierre Yves GUEUGNIAUD	CHU de Lyon.
Pr Jacques HAIECH	UMR7200. Université de Strasbourg.
Pr Alfredo HERNANDEZ	Directeur de recherches INSERM, Univ. de Rennes.
Pr Xavier JOUVEN	Epidémiologiste, Hôpital Européen Georges Pompidou.
Mr Xavier LAROCHE	Directeur e-santé, CRM, Biotronik France.
Dr Aymeric MENET	Rythmologue, Lomme.
Pr Olivier MESTE	Board of Computing in Cardiology, Univ. Côte d'Azur.
Mr Théophile MOHR-DURDEZ	Co fondateur de Volta médical.
Mr Nicolas PIVERT	Dir.Europe Patient Management CRM ; Medtronic.
Dr Arnaud ROSIER	Rythmologue, fondateur et PDG d'Implicity.
Mr Younes YOUSSEFI	Ingénieur doctorant à l'Hôpital Européen Georges Pompidou.

Introduction

Née à la fin de la seconde guerre mondiale avec l'apparition des sciences informatiques, l'IA a pour objectif de construire des dispositifs simulant les processus cognitifs humains.

L'IA a été utilisée pour la première fois en 1956 par John McCarthy. C'est l'apparition de l'apprentissage automatique (*Machine Learning*) qui, au début des années 80, a permis à des programmes informatiques d'apprendre par expérience, sans qu'ils ne soient spécifiquement programmés.

Figure 1 : Les trois niveaux de l'Intelligence artificielle. A. Menet



Après 2010, l'utilisation de réseaux neuronaux a autorisé l'émergence de l'apprentissage profond (*Deep Learning*) pouvant traiter de grosses quantités de données, et a contribué à son développement (Figure 1).

Si les applications de l'IA sont évoquées dans de nombreux domaines de la santé, dont la cancérologie et la radiologie, il apparaît que la rythmologie mérite une attention particulière. En effet les signaux électriques cardiaques sont enregistrés sous forme numérique, en clinique et par les nombreux objets connectés diffusés dans la population, ce qui génère un important potentiel d'application de l'IA.

Nous envisagerons ces diverses applications dans le traitement des fibrillations atriales, puis des arythmies ventriculaires et enfin dans la prédiction des morts subites. L'IA peut s'appliquer avec profit aux données collectées par les dispositifs médicaux connectés implantés ou non. Enfin, une discussion permettra de soulever quelques interrogations posées par l'introduction de l'IA en pratique médicale rythmologique.

1. Application de l'IA en rythmologie interventionnelle

L'ablation de la fibrillation atriale (FA) et la prévention des troubles du rythme post infarctus ont fait l'objet d'applications de l'IA par des « start-ups » dont plusieurs françaises.

1.1. Ablation de la FA : analyse par IA du signal intracardiaque

Le traitement de la FA fait de plus en plus appel aux techniques d'ablation intracardiaque. La première étape en est la réalisation d'une cartographie pour reconstitution anatomique et électrophysiologique de l'oreillette gauche. Cette technique longue et complexe a pu être améliorée par l'apprentissage profond ⁽¹⁾. Elle permet la classification des électrogrammes intracardiaques, dont certains ont des caractéristiques suggérant qu'ils sont l'image des phénomènes électriques rotatoires appelés « rotors », censés être le mécanisme principal de l'arythmie. Son identification dans la masse des enregistrements réalisés dans une même chambre a fait appel à l'IA. Ainsi, une jeune entreprise française a créé un algorithme utilisant l'apprentissage profond qui vise à détecter plus rapidement ces rotors afin d'en réaliser l'ablation ⁽²⁾. L'apprentissage automatique a également été utilisé afin d'identifier la présence de fibrose dans les oreillettes ou de prédire la récurrence de FA après ablation ⁽³⁾.

L'étude, par un modèle informatique personnalisé, de la combinaison du rehaussement tardif du gadolinium dans l'oreillette gauche et de la réponse à des stimuli rapides, a prédit après ablation des veines pulmonaires la récurrence de la fibrillation auriculaire avec une sensibilité et une spécificité de 82 et 89 % ⁽⁴⁾. Ces techniques, sont prometteuses p non encore commercialement disponibles et demandent à être confirmées

1.2. Le traitement des troubles du rythme ventriculaires

À l'étage ventriculaire les différents aspects de la prise en charge des troubles du rythme font aussi appel à l'IA. Ainsi, l'origine des extrasystoles, de même que de la tachycardie ventriculaire (TV), peut-elle être localisée par diverses modalités d'IA appliquée à l'ECG ⁽⁵⁾.

Il est par ailleurs possible de reconstituer, comme il a été cité plus haut pour l'oreillette, un modèle de chambre cardiaque virtuelle (ventricule numérique personnel) spécifique d'un patient donné à partir d'une imagerie classique. L'IRM permet l'étude de l'infiltration du tissu adipeux dans le ventricule et aide à l'identification des cibles d'ablation des TV ⁽⁶⁾.

Dans la sarcoïdose, la fusion des images d'IRM avec celles d'une tomographie par émission de positrons, objective la disposition hétérogène des régions de fibrose et d'inflammation. Il est ainsi possible, dans le cœur virtuel, de simuler l'induction de TV. L'ensemble de ces données permet d'optimiser la prédiction du risque de troubles du rythme fatal ⁽⁷⁾.

De nombreux travaux sont en cours concernant les applications de l'IA dans le traitement aigu des troubles du rythme ventriculaire en salle de cathétérisme, mais aussi dans le domaine prédictif de la mort subite. Ces données sont toutes préliminaires, non encore disponibles sur le marché, mais ont toutes chances d'être largement exploitables par les équipes expérimentées dans les mois qui viennent.

Dans le domaine de la rythmologie interventionnelle, la synergie entre les techniques d'intervention en constante évolution et l'utilisation de l'IA, ont généré des applications dont les plus avancées permettent un traitement plus précis et rapide de la FA et des arythmies ventriculaires.

2. Les troubles du rythme ventriculaire et la mort subite

S'il est important de pouvoir identifier la survenue d'arythmie ventriculaire chez les patients porteurs d'une cardiopathie afin d'éviter une mort subite (MS), le problème peut être abordé à partir des données issues des survivants de MS, ou des essais prospectifs à partir des données en population.

La MS se définit par la survenue d'une mort naturelle chez un sujet, ayant ou non une maladie cardiaque connue. Chaque année, 40 à 60 000 personnes en seraient victimes en France ⁽⁸⁾. Elle survient préférentiellement au domicile, majoritairement par fibrillation ventriculaire (FV).

Introduits aux États-Unis dès le début des années 1980, les défibrillateurs cardiaques externes automatisés (DAE), ont fait rapidement la preuve de leur efficacité pour le traitement d'urgence des morts subites. Ce n'est qu'en 2007 qu'un arrêté a généralisé leur utilisation par le grand public ⁽⁹⁾ et prévu un recueil national des données issues de leur mise en œuvre.

2.1. Les limites des études observationnelles classiques :

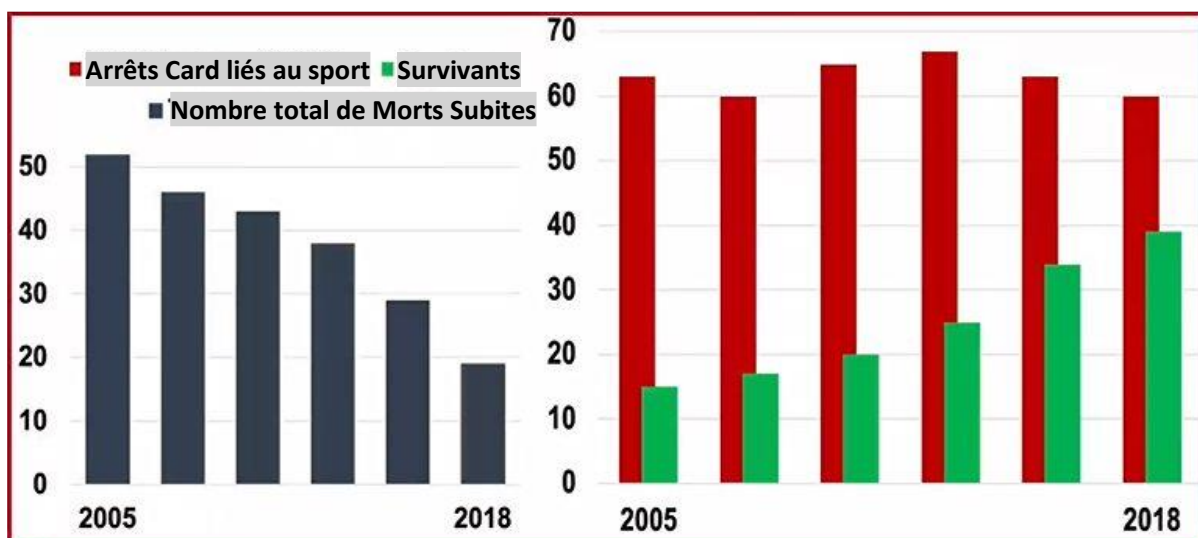
2.1.1. L'étude « Réanimation des Arrêts Cardiaques (RéAC) »

Elle s'appuie sur un registre national de recueil de tous les arrêts cardiaques, médicaux ou traumatiques, traités par les SAMU sur le territoire national. D'avril 2013 à décembre 2014, 23 283 cas ont été analysés. L'âge moyen des patients était de 65 ans, masculin dans 65 % des cas et survenant au domicile pour 72 %. Parmi les morts subites médicales, 4,8 % ont survécu à J30, 1,5 % des arrêts traumatiques ⁽¹⁰⁾.

2.1.2. L'étude du Centre de recherche cardiovasculaire de Paris

Elle réunit initialement l'ensemble des arrêts cardiaques survenus pendant une activité sportive traités par la Brigade des sapeurs-pompiers de Paris et les SAMU 75, 92, 93, 94 depuis 2005 soit 6,8 millions d'habitants ⁽¹¹⁾.

Figure 2 : Évolution du nombre d'arrêts cardiaques pendant une pratique sportive. (Marijon *et al.*, 2021)



Elle montre une diminution progressive du nombre de sportifs décédés au cours d'une activité sportive. Cependant, une analyse plus attentive du phénomène met en évidence que cette diminution n'est pas due à une baisse des arrêts cardiaques pendant la pratique du sport, mais à la lente amélioration de l'efficacité des manœuvres de ressuscitation effectuées immédiatement sur le terrain. Si le taux de survie a augmenté, l'incidence des arrêts cardiaques n'a pas baissé pendant la même période.

2.2 L'étude IA et MS de l'adulte

Poursuivant l'analyse des risques de MS liés à la pathologie cardio-vasculaire effectuée par Myerburg ⁽¹²⁾, dans la population française, l'équipe de Xavier Jouven a orienté ses recherches dans le groupe général de la population où se situe le risque le plus élevé, et non plus seulement dans le groupe porteur de pathologie cardiaque reconnue. L'idée a alors été d'étudier des données non cardiologiques concernant la population générale, issues du système de soins

français. Les données de santé de 350 000 personnes ont ainsi été soumises à l'analyse par l'IA : 10 000 variables ont été retenues sur 14 années soit plus de 300 millions de données du Système national de données de santé.

Les premières analyses révèlent une très grande hétérogénéité des situations, mais les variables non cardio-vasculaires semblent donner les meilleurs résultats de prédiction des MS. Il semble possible d'identifier la population qui a une probabilité à 90 % de faire une MS dans l'année. Il serait également possible de prédire le risque individualisé de MS et d'en faire la prévention. Ces premiers résultats prometteurs, mais non encore publiés, restent à valider.

En conclusion, si l'analyse épidémiologique classique des MS a montré l'efficacité de la prise en charge des MS par la pratique des gestes de survie et la défibrillation automatisée par le public, la puissance de l'analyse par IA permet d'aborder une prévention individualisée par la reconnaissance dans la population générale des groupes d'individus à risque.

3. L'utilisation des données issues des dispositifs médicaux connectés : Le diagnostic de la FA

La FA est classiquement définie par son aspect sur les 12 dérivations de l'électrocardiogramme. Les enregistreurs électrocardiographiques en font le diagnostic par une forme élémentaire d'IA. L'analyse automatique du tracé par l'algorithme conçu par l'un des principaux fabricants sur le marché français a été comparée à celle issue d'un réseau neuronal profond. Ce dernier permet le diagnostic de FA avec une valeur prédictive positive nettement plus élevée que l'algorithme du constructeur ⁽¹³⁾. Du fait de l'utilisation croissante d'appareils portables capables d'enregistrer un tracé d'une ligne d'ECG, la définition de la FA a été élargie à l'enregistrement d'une seule piste de 30 secondes ⁽¹⁴⁾.

La FA est associée à une surmortalité autonome et à l'apparition de troubles cognitifs et de démence. Elle est asymptomatique dans 35 % des cas, et son dépistage, recommandé chez un grand nombre de patients en Europe, a un intérêt souligné récemment dans le bulletin de l'Académie nationale de médecine ⁽¹⁵⁾.

3.1. Les premières études portant sur les données cliniques en population

Seule l'utilisation de l'IA permet d'analyser l'ensemble des données concernant des populations de plusieurs milliers ou millions d'individus.

Dans une population de 2 994 837 individus suivis 7 ans, l'IA a identifié le risque de survenue d'une FA dans 3,19 % des cas. De tous les modèles classiques de risque utilisés dans cette étude, le modèle prédictif optimal est celui issu de l'apprentissage automatique car il inclut des variables dépendantes du temps ⁽¹⁶⁾. Dans une autre étude, l'utilisation d'un algorithme de prédiction du risque issu de l'apprentissage automatique permet d'identifier la sous population la plus à risque. Un test par enregistreur portable est alors réalisé, ce qui a permis d'améliorer encore le diagnostic de FA ⁽¹⁷⁾. Ces résultats, extrapolés à l'ensemble de la population du Royaume Uni, ont permis de montrer que cette approche était économiquement rentable ⁽¹⁸⁾.

Très récemment, a été publiée une étude rétrospective d'une population de 4 350 891 patients de plus de 45 ans issue des bases de données d'une soixantaine de compagnies d'assurance allemandes. Elle a utilisé une technique d'apprentissage automatique (le renforcement de gradient) combinant les facteurs de risque classique et le codage informatique des pathologies. Elle a permis d'individualiser des facteurs prédictifs de FA *de novo* et d'accident vasculaire cérébral ⁽¹⁹⁾.

Ainsi, si les facteurs pronostiques peuvent être pris simultanément en compte, des facteurs temps dépendants peuvent être individualisés, l'ensemble permettant au mieux l'identification des patients à risque, faisant espérer l'arrivée prochaine d'une médecine prédictive individualisée.

3.2. L'analyse des holters longs par IA

Les holters ECG classiques, les plus répandus permettent des enregistrements allant de 24 heures à une quinzaine de jours. Leur lecture est cependant très consommatrice de savoir-faire et de temps. Récemment une IA a été utilisée avec succès par une entreprise française (Cardiologs[®]) pour classer rapidement et de façon fiable les événements enregistrés⁽²⁰⁾. L'utilisation d'un réseau neuronal capable de repérer les FA par reconnaissance de l'onde P permet d'exploiter plus finement et surtout plus rapidement les tracés.

3.3. L'analyse des données de certaines montres « connectées »

Jusqu'à récemment, certaines « montres connectées » se basaient essentiellement sur l'altération rythmique par photopléthysmographie, réflexion d'un signal lumineux en fonction du pouls détecté au poignet. Cette technique souffre de réelles limites de recueil avec un grand nombre de faux positifs, mais le signal traité par apprentissage profond l'améliore très sensiblement⁽²¹⁾.

Ces montres connectées permettent l'enregistrement d'une dérivation ECG. Celles de deux constructeurs (Apple[®] et Kardia Band[®]) ont été récemment évaluées et les diagnostics automatiques de la FA assurés par ces deux machines comparés, dans un premier temps sur les données brutes, puis après réinterprétation par un clinicien⁽²²⁾. Si l'acuité diagnostique du Kardia Band[®] est supérieure à celle de la montre Apple[®], leurs performances ont toujours été améliorées par le clinicien. Ceci renforce l'idée que le meilleur résultat allierait l'apport de l'interprétation humaine (*Human in the Loop*) à l'apprentissage automatique.

Une autre possibilité utilisée par la société française (Withings[®]) est de combiner plusieurs paramètres biologiques : apnée du sommeil, saturation en oxygène et, dans le futur, à divers autres paramètres biologiques, permettant ainsi de constituer un dossier numérique regroupant ces informations⁽²³⁾.

3.4. L'analyse par IA des appareils implantés

Plus l'enregistrement ECG est prolongé, plus le diagnostic de FA est élevé. Les enregistreurs sous-cutanés dédiés permettent jusqu'à deux années d'enregistrement. Ils sont générateurs de données massives mais souffrent, malgré les possibilités de programmation, d'une incidence élevée de faux positifs entraînant un temps d'analyse important. Une solution a été proposée par une entreprise française (Implicity[®]), permettant l'analyse des tracés par un algorithme qui, après apprentissage automatique, permet d'éliminer les faux positifs⁽²⁴⁾. Une autre approche utilise l'apprentissage profond d'analyse du signal ECG avec un résultat similaire⁽²⁵⁾.

L'IA est ainsi d'une grande aide dans la gestion des outils classiques du diagnostic. Mais en l'état actuel, ces résultats sont encore améliorés par l'interprétation humaine a posteriori. Son utilisation est de plus en plus fréquente en recherche, dans la gestion des données multiples et simultanées issues des appareils portables. Mais il est encore trop tôt pour prédire quand ces techniques seront reconnues et recommandées pour utilisation en routine clinique.

3.5. IA et prédiction par l'ECG en rythme sinusal

Pour être reconnaissables par le médecin sur l'ECG classique à 12 dérivations, les modifications de propagation de l'impulsion électrique doivent être suffisamment marquées.

L'analyse par l'IA de modifications fines, invisibles à l'œil nu, d'échantillons de 10 secondes d'ECG réalisés chez 180 922 patients s'est avérée capable de prédire le risque de survenue de FA⁽²⁶⁾. Une autre étude portant sur 1 600 000 ECG avec apprentissage profond, prédit la FA et la survenue d'AVC, confirmant la puissance de cette approche⁽²⁷⁾.

Une autre source de l'ECG en rythme sinusal provient des appareils mobiles. Très récemment, les six dérivations standards issues d'un appareil Kardia Mobile ont été utilisées chez 73 861 utilisateurs, ce qui a permis l'obtention de 267 614 électrocardiogrammes. Après entraînement, un réseau neuronal a pu prédire la survenue de la fibrillation de façon fiable⁽²⁸⁾.

A partir des dossiers de 415 389 patients du Minas Gerais (Brésil), une analyse par apprentissage profond a traité 1 130 404 données cliniques ECG et démographiques. Le modèle le plus prédictif de la survenue de FA a été celui où ont été combinées (29) les variables liées à la morphologie de l'onde P, mais aussi à l'espace PR ainsi qu'aux QRS (largeur et amplitude).

Ainsi les enregistrements électrocardiographiques numérisés mémorisés par les divers appareils constituent une masse considérable de données exploitables essentiellement par l'IA. Celle-ci peut être utilisée dans le cadre d'études académiques publiques, ou d'applications par des entreprises privées permettant une démarche diagnostique prédictive dans la population ou individualisée.

L'analyse par l'IA des divers enregistrements électrocardiographiques pouvant être associées à des données démographiques permettent d'augmenter fortement les possibilités diagnostiques de la FA. Il serait souhaitable qu'en France une banque nationale de données ECG permette un traitement systématique de ces enregistrements.

4. Discussion

L'IA a d'ores et déjà prouvé son utilité dans divers domaines de la rythmologie et il ne s'agit que d'un début. À l'instar des très nombreux domaines de l'activité humaine et technologique où l'IA intervient, plusieurs points méritent d'être discutés.

4.1. La gestion et l'exploitation des données

La collecte, l'organisation et la valorisation des données de santé sont devenues une priorité. Ainsi, se sont développés les entrepôts de données de santé. Si le rythmologue, l'hôpital, l'industriel ou le patient n'en sont pas vraiment « propriétaires », la protection des données à caractère personnel est régie par le règlement général sur la protection des données (RGPD) et par la loi informatique et liberté. La protection de l'intimité et de la vie privée est rendue plus complexe, faisant craindre une démarche de ciblage des risques (assurances).

En France les données de santé sont sous-exploitées du fait de la carence de digitalisation du système de soin, du manque de structuration des données électroniques existantes, des ressources dans les établissements de soins, et de difficultés de compréhension de la réglementation existante.

Un exemple à suivre d'exploitation et de développement pourrait être l'initiative internationale <https://physionet.org>, qui permet à la communauté scientifique de mettre au point des algorithmes d'IA en utilisant une base d'apprentissage ouverte et en introduisant la notion de « concours ». Ce type de recherche est organisé lors des conférences *Computing in Cardiology* (<https://cinc.org>). D'autres solutions existent pour répondre à ce défaut d'exploitation des données qui pourraient associer acteurs publics et privés : la rythmologie, aidée ainsi de l'IA en bénéficierait grandement.

4.2. Le Health Data Hub (HDH)

Du fait de l'importance du patrimoine de données de santé au niveau national, de son caractère éparpillé, cloisonné et à délais d'accès dissuasifs, le HDH, groupement d'intérêt public, a été créé en décembre 2019 avec pour mission de préparer un accès aisé, unifié, transparent et sécurisé aux données de santé. Toute demande d'accès à des données de santé requérant une autorisation de la CNIL et du CESREES (comité éthique et scientifique pour les recherches, les études et les évaluations en Santé) doit y être déposée. Les projets sont publiés, afin d'en garantir la transparence. Chaque année, 300 projets sont soumis au HDH qui continue à se développer.

4.3. Éthique et développement des solutions d'IA en santé

L'IA a pu être définie comme une programmation d'agent autonome qui, après acquisition et traitement des données, prendra une décision et agira. Dans ce sens en rythmologie, un stimulateur cardiaque qui détecte une bradycardie, ou un défibrillateur devant une FV agiront tous les deux en identifiant le trouble du rythme et en délivrant le traitement approprié. Les multiples fonctions régissant l'IA sont basées essentiellement sur les mathématiques mais aussi sur la logique, la psychologie cognitive, la linguistique et d'autres domaines. L'IA a permis la ré-ingénierie d'objets quotidiens (montre, vélo, lunettes, stéthoscope...).

Ces applications de l'IA posent des problèmes éthiques. Ainsi l'exemple très connu de l'erreur de jugement d'une machine, où une IA pilotant automatiquement un véhicule n'a pu empêcher une collision, peut avoir des conséquences dramatiques, mais aussi en termes de détermination de la responsabilité. Ces conséquences peuvent être inappropriées supportant la notion d'une « garantie humaine » d'assistance à la délibération. En rythmologie, les mêmes erreurs de jugement pourraient avoir des effets aussi dramatiques.

Plus de 84 comités ont recommandé 62 principes éthiques applicables aux techniques numériques. Malgré cela, la démarche éthique est actuellement encore insuffisante. En médecine, l'utilisation dévoyée de l'IA pourrait avoir des conséquences graves. Ainsi, l'interface cerveau ordinateur aidera la réhabilitation après un AVC, mais pourrait également autoriser une lecture de la pensée au grand danger potentiel.

La nécessité de développement de la réflexion éthique persiste. Si « le mal est la disjonction des vertus : être courageux sans être sincère, sincère sans être juste (V. Jankelevitch) », le rôle de l'éthique est de discuter les compromis nécessaires entre les vertus et les risques de chaque situation concrète. À ce jour et malheureusement, les notions d'éthique dans les applications en rythmologie ne sont pas encore réellement abordées.

4.4. Les conséquences de l'IA dans la relation médecin-patient

Les travaux du comité consultatif national d'éthique, puis la loi de bioéthique ont préconisé un contrôle de l'utilisation du numérique et la notion d'information préalable et de consentement du patient dont les données sont soumises à une IA.

Une proposition de règlement européen relative à l'IA a été adoptée en avril 2021. Les professionnels de santé ont un devoir d'information de la personne concernée et le concepteur d'algorithme doit s'assurer de leur explicabilité et de leur bon fonctionnement par les utilisateurs.

La gestion par l'IA des données massives en rythmologie pourra aboutir à des situations nouvelles éventuellement inattendues et traumatisantes, par exemple la prédiction d'un risque élevé d'arythmie grave ou de mort subite chez un sujet qui se croit sain, hors cadre pathologique conventionnel.

En avril 2022 ont été publiées les recommandations du ministère des solidarités et de la santé et des recommandations de bonne pratique pour intégrer l'éthique dès le développement des applications d'IA en santé : la rythmologie doit évidemment s'y conformer.

4.5. Explicabilité de l'IA en rythmologie

L'IA peut seconder voire remplacer le médecin dans diverses de ses fonctions. Mais il existe un défaut d'acceptabilité lié à l'absence de compréhension des mécanismes de l'analyse et de la prise de décision par la machine, véritable « boîte noire ». Ceci semble contraire aux bonnes pratiques actuelles et peut diminuer la confiance du patient en son médecin⁽³⁰⁾. L'explicabilité d'un processus IA diagnostique ou thérapeutique, toujours désirable, n'est cependant pas toujours réalisable. Très récemment, un exemple d'essai de compréhension du processus décisionnel d'un réseau neuronal en rythmologie est la tentative d'explication de l'interprétation de l'ECG basée sur l'apprentissage profond par l'utilisation des auto-encodeurs variationnels, qui est une technique d'IA spécifique⁽³¹⁾.

Il existe également des possibilités d'erreurs méthodologiques de conception ou d'évaluation aboutissant à la possibilité d'une IA de performance médiocre, souvent trop optimiste. L'exemple (non médical) fameux est celui d'un essai de distinction entre des huskies et des loups par réseaux neuronaux profonds qui a été faussée car liée à un critère concernant l'arrière-plan (un fond neigeux) plutôt que sur les critères morphologiques de l'animal ⁽³²⁾.

Comme dans tous les domaines de l'activité humaine et scientifique, l'intelligence artificielle est depuis quelques années fortement sollicitée en rythmologie. Elle est particulièrement utile dans le traitement en temps réel des données des cartographies intracardiaques de la rythmologie interventionnelle, mais aussi dans l'exploitation de celles fournies par les nombreux appareils portables. Elle est appelée à se développer encore ce qui, en améliorant les diagnostics et les prises en charge, renforcera encore le rôle du médecin à qui doit toujours revenir la décision finale.

Propositions

1- **IA et Rythmologie**

Soutenir le développement de banques de données médicales massives françaises permettant leur traitement par l'IA par des chercheurs académiques et industriels autour de projets contractuels d'intérêt mutuels. Pour les rythmologues, disposer d'une banque nationale d'électrocardiogrammes permettrait de réaliser des études notamment en utilisant l'IA.

2- **Former les médecins rythmologues à la maîtrise de l'IA**

Afin de préparer nos confrères aux applications devenant incontournables de l'IA en cardiologie et leur permettre l'accès aux bases de données numériques, il nous paraît justifié :

- **D'intensifier la formation initiale et continue en IA appliquée à la santé** en proposant un complément de formation aux médecins, mais aussi aux ingénieurs, dans des parcours fortement multidisciplinaires, associant cliniciens et chercheurs ;
- **De renforcer le niveau mathématique et informatique des médecins rythmologues**, idéalement en favorisant le contact et des travaux communs avec un doctorant en mathématiques et informatique.
- **Favoriser l'explicabilité des processus de l'IA** qui est un élément majeur de l'appropriation par les médecins des résultats de l'IA. La vérification des propositions issues de l'IA, la création de procédures certifiées et le maintien d'une supervision médicale y contribueront.

3 - **Solidifier les aspects éthiques et juridiques le l'IA notamment en cardiologie**

Leur indétermination et fractionnement actuels doivent être réduits afin d'aider au développement de la recherche et des mises sur le marché. Les relations instituts de recherche-industrie nécessaires au progrès doivent être éclairées et encouragées.

Références

- ¹ Schwartz AL, Chorin E, Mann T *et al.* Reconstruction of the left atrium for atrial fibrillation ablation using machine learning CARTO3 m-FAM software. *J Interv Card Electrophysiol* 2022; 64:39-47
- ² Seitz J., Bars C., Théodore G. *et al.* : AF ablation guided by spatiotemporal electrogram dispersion without pulmonary vein isolation: a wholly patient-tailored approach. *J Am Coll Cardiol* 2017; **69**: 303
- ³ Zou F, Brahier M, Migliarese F *et al.* A machine learning-derived recurrence risk model for atrial fibrillation after catheter ablation. *Heart rhythm* 2021; 18: S219-S220
- ⁴ Shade JK *et al.* Preprocedure Application of Machine Learning and Mechanistic Simulations Predicts Likelihood of Paroxysmal Atrial Fibrillation Recurrence Following Pulmonary Vein Isolation. *Circ Arrhythm Electrophysiol.* 2020 ; 13: e008213. DOI: 10.1161/CIRCEP.119.008213
- ⁵ Missel R, Gyawali PK, Murkute JV *et al.* A hybrid machine learning approach to localizing the origin of ventricular tachycardia using 12-lead electrocardiograms. *Comput Biol Med* 2020; 126: 14013
- ⁶ Sung E, Prakosa A, Aronis KN *et al.* Personalized digital-heart technology for ventricular tachycardia ablation targeting in heart with infiltrating adiposity. *Circ Arrhythm Electrophysiol* 2020; 13 (12) e008912
- ⁷ Shade JK, Prakosa A, Popescu DM *et al.* Predicting risk of sudden cardiac death in patients with cardiac sarcoidosis using multimodality imaging and personalized heart modeling in a multivariable classifier. *Sci. Adv.* 2021; 7:eabi8020
- ⁸ Rapport 18-10 de l'académie nationale de médecine. Arrêt cardiaque subit : pour une meilleure éducation du public. *Bull. Acad. Natle Méd.*, 2018, 202, no 7, 1341-1353, séance du 2 octobre 2018
- ⁹ Décret n° 2007-705 du 4 mai 2007 relatif à l'utilisation des défibrillateurs automatisés externes par des personnes non médecins et modifiant le code de santé publique. <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000000278696> .
- ¹⁰ <https://epidemiologie-france.aviesan.fr/epidemiologie-france/fiches/registre-electronique-des-arrets-cardiaques>
- ¹¹ Marijon E. *et al.* Active continuous multisource surveillance of all sudden cardiac arrests during sports in the great Paris area since 2005. *Paris SDEC Investigators JACC* 2021
- ¹² Myerburg. R J.. Sudden Cardiac Death Caused by Coronary Heart Disease, *Circulation* 1992. 125 (8): 1043-1052
- ¹³ Smith SW *et al.* A deep neural network for 12-lead electrocardiogram interpretation outperforms a conventional algorithm, and its physician overread, in the diagnosis of atrial fibrillation. *Int J Cardiol Heart Vasc* 2019;25:100423
- ¹⁴ Hindricks G, Potpara T, Dagres N, Arbelo E, Bax JJ Blomström-Lundqvist C *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). *European Heart Journal* (2020) 42, 373_498
- ¹⁵ N.Saoudi, G.Latcu, B. Enache *et al.* Place de la médecine connectée dans la détection de la fibrillation atriale *Bulletin de l'Académie Nationale de Médecine* 2022; 206 (1) : 73-81
- ¹⁶ Lip GYH, Tran G, Genaidy A *et al.* Improving dynamic stroke risk prediction in non-anticoagulated patients with and without atrial fibrillation: comparing common clinical risk scores and machine learning algorithms. *European Heart Journal - Quality of Care and Clinical Outcomes* 2022; (8), 5: 548–556
- ¹⁷ Hill NR, Groves L, Dickerson C *et al.* identification of undiagnosed atrial fibrillation patient's using a machine learning risk prediction algorithm and diagnostic testing (PULSe-AI) *Contemp clin trials* 2020; 99: 106191

-
- ¹⁸Hill NR, Groves L, Dickerson C, Boyce R, Lawton S, Hurst M *et al.* Identification of undiagnosed atrial fibrillation using a machine learning risk prediction algorithm and diagnostic testing in primary care (PULsE-AI): cost-effectiveness of a screening strategy evaluated in a randomized controlled trial in England. *Journal of medical economics.* 2022, 25, (1), 974–983
- ¹⁹Schnabel RB *et al.* Machine learning-based identification of risk-factor signatures for undiagnosed atrial fibrillation in primary prevention and post-stroke in clinical practice. *European Heart Journal - Quality of Care and Clinical Outcomes* (2023) 9, 16–23
- ²⁰Fiorina L, Marijon E, Maupain C *et al.* AI-based strategy enables faster Holter ECG analysis with equivalent clinical accuracy compared to a classical strategy *EP Europace*, 2020 ; 22, (1), euaa162.374
- ²¹Poh MZ, Poh YC, Chan PH *et al.* Diagnostic assessment of a deep learning system for detecting atrial fibrillation in pulse waveforms. *Heart* 2018 Dec;104(23):1921-1928
- ²²Ford C, Xie Cx, Low A, *et al.* Comparison of 2 Smart Watch Algorithms for Detection of Atrial Fibrillation and the Benefit of Clinician Interpretation: SMART WARS Study *JACC Clin Electrophysiol* 2022 Jun;8(6):782-791.
- ²³Kirszenblat R et Edouard P. Validation of the Withings ScanWatch as a Wrist-Worn Reflective Pulse Oximeter: Prospective Interventional Clinical Study. *J Med Internet Res.* 2021 Apr; 23(4): e27503
- ²⁴Crespin E, Bonnet JL, Ibnouhsein I *et al.* The application of a novel AI-based algorithm in implantable loop recorders, reduction in false positive atrial arrhythmia event episodes without impacting time to first event detection. *J Am Coll Cardiol.* 2022 Mar, 79 (9_Supplement) 2008
- ²⁵Mittal S, Oliveros S, Li J *et al.* AI Filter improves positive predictive value of atrial fibrillation detection by an implantable loop recorder. *J Am Coll Cardiol EP* 2021; (8) 965–975
- ²⁶Attia Z, Noseworthy PA, Lopez-Jimenez F *et al.* An artificial intelligent-enabled ECG algorithm for the identification of patients with atrial fibrillation during sinus rhythm: a retrospective analysis of outcome prediction. *The Lancet* 2019; 394 (10201) 861–867
- ²⁷Raghunath S, Pfeifer JM, Ulloa-Cerna AE *et al.* Deep Neural Networks Can Predict New-Onset Atrial Fibrillation From the 12-Lead ECG and Help Identify Those at Risk of Atrial Fibrillation–Related Stroke. *Circulation* 2021. 143 : 1287-1298
- ²⁸Raghunath A *et al.* Artificial intelligence–enabled mobile electrocardiograms for event prediction in paroxysmal atrial fibrillation. *Cardiovascular Digital Health Journal* 2023;4:21–28
- ²⁹Biton S, Gendelman S, Ribeiro AH *et al.* atrial fibrillation risk prediction from the 12 lead electrocardiogram using digital biomarkers and deep representation learning. *European heart journal-digital health* (2021) 2, 576-585.
- ³⁰Amann J, Blasimme A, Vayena E *et al.* Explainability for artificial intelligence in health care: A multidisciplinary perspective. *BMC Med Inform Decis Mak* 2020; 20:310
- ³¹Van de Leur R, Bos MN, Taha K *et al.* Improving explainability of deep neural network-based electrocardiogram interpretation using variational autoencoders. *European Heart Journal - Digital Health* 2022, 3, (3), 390–404
- ³²Samek W, Montavon V, Lapuschkin S *et al.* Explaining Deep Neural Networks and Beyond: A Review of Methods and Applications. arXiv:2003.07631v2 [cs.LG]

Pour copie certifiée conforme

A handwritten signature in blue ink, consisting of a stylized 'C' and 'B' followed by a vertical line and a horizontal line at the top, forming a rectangular shape.

Professeur Christian BOITARD
Secrétaire perpétuel