L'année cardiologique

Quoi de neuf en imagerie cardiovasculaire ?

T. PEZEL[1], **J. GAROT**[2]
[1]Service de Cardiologie, CHU Lariboisière, PARIS
[2]Institut Cardiovasculaire Paris Sud, MASSY.

Cette année encore la place de l'IRM et du scanner cardiaque gagne du terrain dans notre pratique quotidienne. L'imagerie cardiovasculaire multimodale constitue aujourd'hui le fer de lance des dernières innovations en cardiologie.

À l'heure où l'accès à la cardiologie pour les internes connaît une réforme en profondeur avec la création de trois sur-spécialités (incluant l'imagerie d'expertise, la cardiologie interventionnelle et la rythmologie), l'imagerie apparaît comme la plus attractive pour les jeunes. En effet, un sondage récent réalisé par le Collège des cardiologues en formation (CCF, le groupe des jeunes de la Société française de cardiologie), auprès des internes choisissant leur poste de docteur junior, a montré que la spécialité imagerie d'expertise était de loin la plus demandée.

L'objectif de cet article est de présenter les nouveautés du domaine en insistant sur les innovations actuelles et futures pour notre pratique.

IRM CARDIAQUE

1. Confirmation de l'intérêt de l'évaluation du couplage auriculoventriculaire gauche

Alors que la valeur pronostique de multiples paramètres fonctionnels évaluant séparément le ventricule gauche (volumes VG, FEVG, *strain* du VG…) et l'oreillette gauche (volumes de l'oreillette gauche, *strain* de l'OG…) est aujourd'hui bien démontrée, plusieurs équipes ont publié très récemment des données en faveur de l'intérêt d'évaluer simultanément le VG et l'OG. L'aventure du couplage auriculoventriculaire gauche a débuté au sein du Johns Hopkins hospital à Baltimore, avec la création d'un premier index de couplage auriculoventriculaire gauche évalué en IRM cardiaque : le *left atrio-ventricular coupling index* (LACI), que l'on peut définir comme suit : volume télédiastolique de l'oreillette gauche divisé par le volume télédiastolique du ventricule gauche" (***fig. 1***) [1].

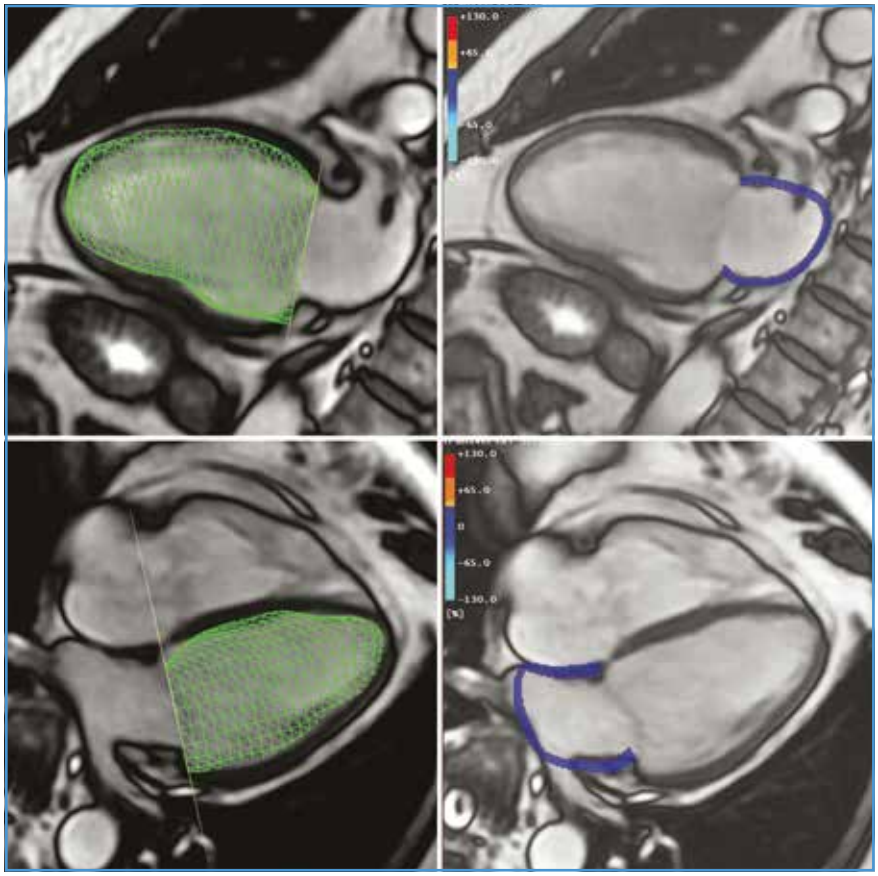

Fig. 1 : Nouvel index de couplage auriculoventriculaire gauche (LACI), supérieur à tous les paramètres VG et OG pour prédire la survenue de fibrillation auriculaire (d'après Pezel *et al. Radiology*, 2022 [2]).

Une étude publiée dans *Radiology* cette année a montré que la valeur pronostique du LACI évaluée sur une cohorte d'individus indemnes de maladie CV (MESA study) était supérieure à n'importe quel autre paramètre évaluant le VG ou l'OG séparément pour la prédiction de la survenue de fibrillation auriculaire [2]. Plus récemment, l'équipe du Professeur Jeroen Bax (Leyden) a également montré la supériorité du LACI par rapport aux autres paramètres VG ou OG pour prédire la survenue de fibrillation auriculaire dans une cohorte de patients atteints de cardiomyopathie hypertrophique [3]. Enfin, l'équipe allemande du Professeur Andreas Schuster (Göttingen) a présenté à l'ESC des résultats très intéressants rapportant, là encore, une valeur pronostique indépendante du LACI pour prédire la survenue d'évènements CV majeurs (MACE) dans une cohorte de patients post-infarctus du myocarde.

Tous ces résultats d'études, réalisées à partir de cohortes de patients complètement différentes et dans de multiples pays, soulignent un intérêt clinique majeur à l'évaluation du couplage auriculoventriculaire chez nos patients. Ainsi, plus qu'un énième index d'imageries cardiaques, le LACI est un véritable signal plaidant pour l'évaluation simultanée du couplage auriculoventriculaire gauche dans notre pratique quotidienne.

Index défini par le rapport du "volume télédiastolique de l'oreillette gauche divisé par le volume télédiastolique du ventricule gauche" permettant de détecter simultanément des anomalies du VG et de l'OG.

2. *Machine learning* pour la création d'outils de stratification pronostiques puissants, à partir de données d'IRM cardiaque

L'IA révolutionne la façon d'analyser et de traiter l'ensemble des mesures réalisées. En effet, une fois que l'IRM cardiaque est réalisée avec ses dizaines de paramètres mesurées et ses diagnostics posés, comment ces différentes entités doivent-elles être agencées entre elles, pour offrir la meilleure stratification du risque CV de nos patients ? Le *machine learning* supervisé est une façon efficace d'adresser cette question, de plus en plus présente dans les études cette année, avec des performances supérieures aux études utilisant des modèles traditionnels. Ainsi, nous allons voir à travers cette partie, les grands principes de cette analyse de données issues de l'imagerie CV.

>>> Deux étapes clés du concept de *machine learning* score

La création d'un outil de stratification du risque CV utilisant des algorithmes de *machine learning* passe par deux étapes importantes (***fig. 2***) :
– identification des variables d'intérêt (*feature selection*) : l'IA sélectionne les variables les plus intéressantes pour stratifier le risque CV du patient.
– construction du modèle avec création d'un score (*model building*) : création par l'IA d'une formule mathématique plus ou moins complexe proposant l'association des variables d'intérêt sélectionnées la plus efficace pour prédire la survenue d'évènements.

>>> Étape 1 : identifier les paramètres d'intérêt

La première étape importante lorsque l'on cherche à proposer une stratification efficace du risque CV du patient, consiste à identifier les variables nécessaires et pertinentes à cette stratification. Il existe ainsi différents algorithmes de *machine learning* dont le plus classique est le *random survival forest*, permettant d'identifier les variables d'intérêt au sein d'une longue liste de paramètres cliniques, biologiques et échocardiographiques (une centaine de paramètres fréquemment analysés) (***fig. 3***). Cette étape d'identification des variables d'intérêt pour la construction d'un outil de stratification pronostique puissant est absolument cruciale.

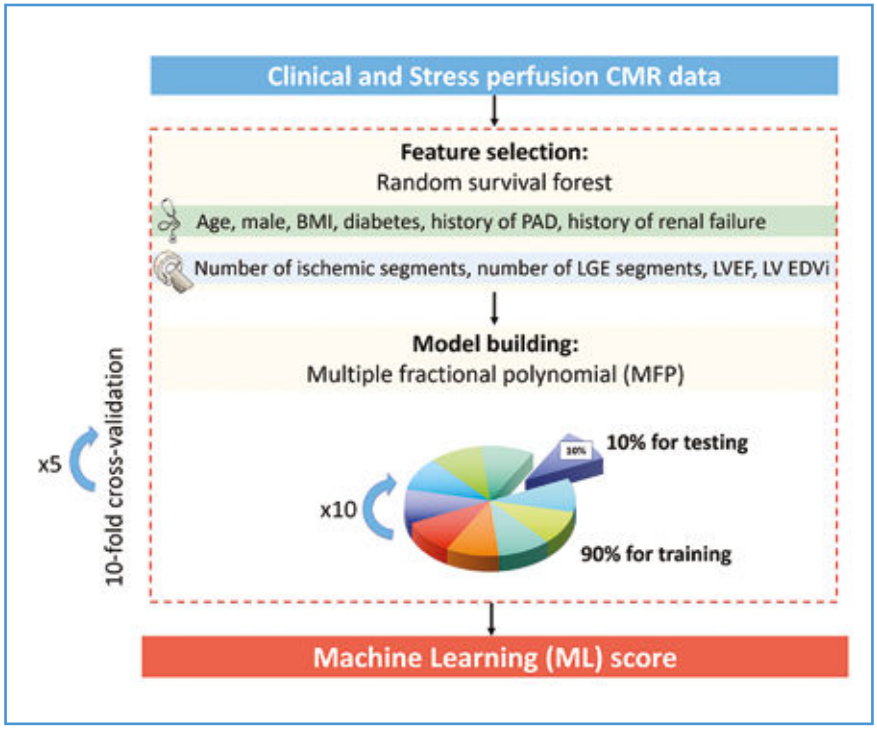

Fig. 2 : Exemple de la création d'un score de *machine learning* incluant des paramètres cliniques, biologiques et d'IRM cardiaque de stress (d'après Pezel T *et al. JACC CV imaging*, 2022 [4]).

L'année cardiologique

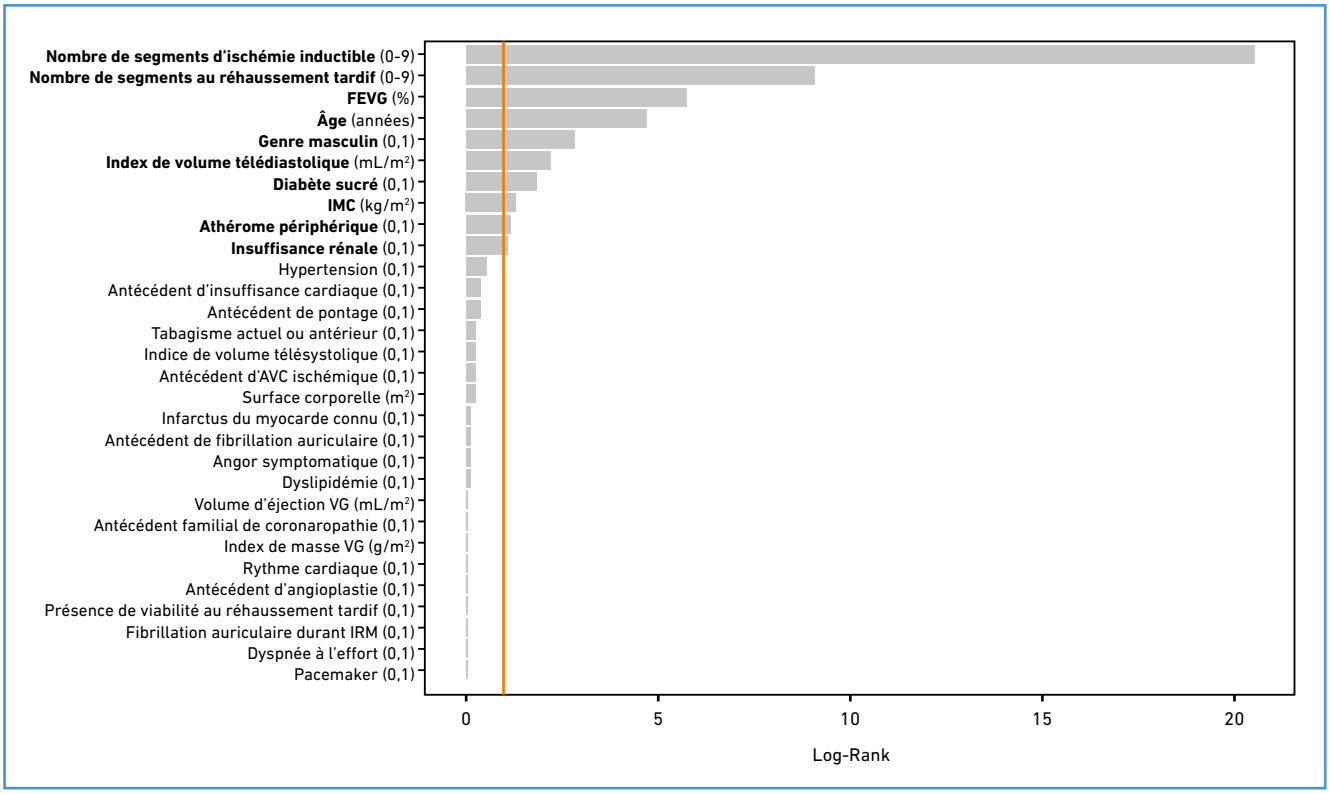

Fig. 3 : Exemple de la sélection des variables d'intérêt en fonction d'un algorithme d'IA, appelé *random survival forest*. Identification des dix paramètres les plus importants pour prédire le risque de mortalité des patients parmi une liste de plusieurs dizaines variables cliniques, biologiques et d'imagerie (d'après *Pezel T et al. JACC CV imaging*, 2022 [4]).

>>> Étape 2 : construction d'un modèle de stratification pronostique puissant

Une fois que les premiers algorithmes de *machine learning* nous ont permis d'identifier les variables les plus pertinentes pour prédire le risque de survenue d'évènements CV chez nos patients, nous allons devoir trouver une façon efficace de les agencer entre elles au sein d'un score. En effet, certains paramètres devront être exprimés au carré, ou au cube ou encore utiliser l'inverse de la racine carrée de la variable… On utilise alors d'autres algorithmes de *machine learning* pour créer cette formule mathématique, comme par exemple la multiple fractional polynomial (MFP). L'objectif de ces algorithmes est de produire une formule mathématique, parfois complexe, permettant de tirer le maximum d'informations pronostiques de chacune des variables préalablement identifiées comme pertinentes. Vous obtenez alors un véritable score construit à partir du *machine learning*.

Il est intéressant de souligner le fait que de nombreuses études récentes montrent que l'ensemble de ces scores, construits à l'aide d'outils de *machine learning*, sont systématiquement plus performants pour la stratification pronostique des patients que les modèles traditionnels utilisés jusqu'alors (score de Framingham, score ESC, etc.).

3. Poursuite du développement de l'IRM cardiaque interventionnelle

Le principe de l'IRM interventionnelle est d'utiliser l'IRM cardiaque (initialement développée pour le guidage du cathétérisme cardiaque droit) pour guider certains gestes invasifs. Plusieurs équipes ont débuté des protocoles de recherche clinique pour le guidage de l'ablation de flutter, de fibrillation auriculaire, ou de tachycardie ventriculaire [5].

Au-delà de l'intérêt pour le patient de supprimer le risque d'exposition aux rayons, le guidage par IRM cardiaque permet de visualiser et cibler précisément le substrat à ablater. Une fois que le geste est terminé, l'opérateur peut contrôler l'efficacité de son geste d'ablation grâce à l'excellente caractérisation du tissu myocardique. En effet, l'IRM cardiaque permet alors d'identifier précisément l'œdème et la nécrose myocardiques créés par l'ablation, offrant donc une "vérification tissulaire" du geste d'ablation [6]. Enfin, si l'opérateur n'est pas satisfait du résultat, il peut compléter la procédure d'ablation directement.

Les progrès de la technologie et la volonté des grandes équipes internatio-

nales travaillant sur le sujet permettront probablement dans un avenir proche de proposer cette technique plus largement afin d'améliorer encore l'efficacité de ces techniques de cardiologie interventionnelle de pointe.

4. Valeur pronostique incrémentale de l'IRM de stress par rapport aux seules données du coroscanner

Dans une étude française récente évaluant 2 038 patients symptomatiques ayant ≥ 1 sténose ≥ 50 % sur un scanner coronaire, la réalisation d'une IRM de stress a montré une valeur pronostique surajoutée (évènements cliniques majeurs : mortalité cardiovasculaire ou infarctus du myocarde non fatal) par rapport aux seules données pronostiques établies du scanner, sur un suivi médian de 6,8 ans (13,8 % d'évènements cliniques majeurs) [7]. Cette étude renforce la place de l'IRM de stress en clinique et consolide l'approche fonctionnelle mise en avant par les recommandations.

Scanner cardiaque

1. FFR-CT

La FFR-CT (*fractional flow reserve derived from coronary CT angiography*) est une technique utilisant des algorithmes de traitement du signal, en lien avec la physique de la mécanique des fluides appliquée aux images du coroscanner afin d'analyser quantitativement le flux coronaire [8, 9]. En effet, le principe est d'obtenir une mesure proche de celle de la FFR traditionnelle mesurée de façon invasive (***fig. 4***).

Plusieurs études ont montré que la FFR-CT non invasive du scanner coronaire donne des résultats proches de la FFR traditionnelle communément utilisée en salle de cathétérisme [10]. Le but est de guider au mieux la revascularisation coronaire, en évitant d'être inutilement invasif, en adressant un patient en

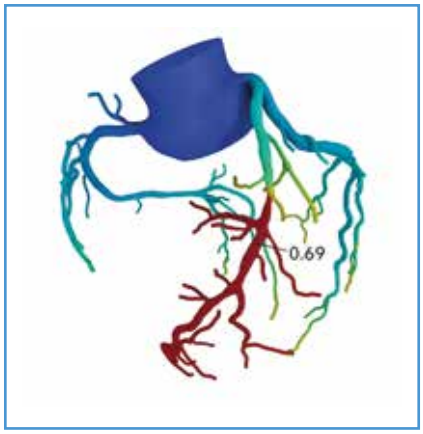

Fig. 4 : Exemple de FFR-CT réalisé à partir d'un scanner traditionnel (*courtoisie iconographie par* HeartFlow®). Illustration d'une perfusion coronaire obtenue à partir d'un coroscanner standard. Ici une sténose hémodynamiquement significative de l'IVA moyenne avec FFR inférieure à 0,80.

coronarographie pour une lésion non responsable de ses symptômes.

Cependant, le coroscanner standard n'est pas à laisser de côté. En effet, très récemment l'étude multicentrique CREDENCE a montré chez 612 patients que les données anatomiques du coroscanner et l'analyse de la plaque (*spotty calcification*, remodelage positif de la plaque, *napkin ring sign* et la présence de plaque à faible atténuation < 50 UH) était supérieure à l'imagerie fonctionnelle comprenant l'analyse de la perfusion et FFR-CT pour le diagnostic de FFR < 0,80 comme *gold-standard* [11].

Il est important de souligner que les nouvelles recommandations américaines AHA/ACC de novembre 2021 ont inclus la FFR-CT dans les examens à réaliser devant une douleur thoracique avec un niveau de recommandation IIa. Cependant, la grande limite de cette technique reste son coût très élevé, allant de 900 à 1500 $ par examen.

Enfin, on pourrait imaginer coupler le coroscanner, le scanner de perfusion de stress et la FFR-CT dans un même examen. Cette double évaluation, à la fois morphologique et fonctionnelle au niveau de la coronaire, et fonctionnelle au niveau de la perfusion du myocarde, pourrait permettre d'orienter au mieux les patients les plus complexes, comme les patients pluritronculaires ou pontés.

2. Le scanner à comptage photonique

Le monde du scanner cardiaque connaît incontestablement une révolution technologique sans précédent : l'arrivée des scanners à comptage photonique.

Ces scanners en cours de développement sur très peu de centres français (Lyon, Monaco, Lille…) constituent une véritable prouesse technologique en termes de résolution spatiale et temporelle avec un coût allant de 2 à 2,5 millions d'€ par machine. L'objectif de cette partie est de présenter les grands principes de ce scanner du futur pour notre pratique.

La technologie utilisée par les scanners à comptage photonique est complètement différente des scanners actuels, dès l'acquisition des images [12,13]. Les détecteurs classiquement utilisés sur les scanners traditionnels sont des détecteurs à scintillation solide qui réalisent l'acquisition des images en deux étapes, comprenant :
– l'absorption des rayons X convertis en lumière visible dans le cristal de scintillation ;
– la conversion de la lumière obtenue en signal électrique par une photodiode fixée à l'arrière de chaque cellule de détection.

Dans le cadre des scanners à comptage photonique, les détecteurs à scintillation solide sont remplacés par des détecteurs à comptage photonique capables de transformer directement les photons de rayons X en signaux électriques (***fig. 5***) [12]. Ainsi, ces nouveaux détecteurs permettent de repousser les limites des détecteurs de scanners actuels en fournissant des données tomodensitométriques à très haute résolution spatiale (environ cinq fois meilleure qu'avec un scanner classique), sans bruit électronique, caractérisées par un rapport

L'année cardiologique

Fig. 5 : Principe du scanner à comptage photonique [12]. Différences entre le détecteur classique à scintillation solide et le nouveau détecteur à comptage photonique (*Courtoisie iconographie par Siemens Healthineers*).

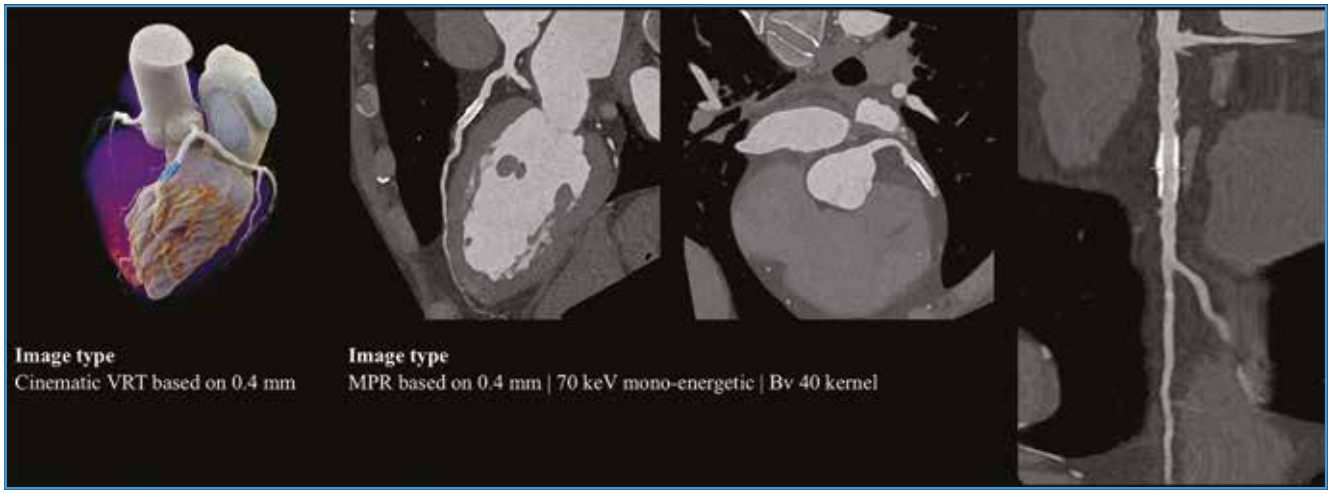

Fig. 6 : Optimisation de l'analyse intrastent coronaire grâce à l'amélioration de la résolution spatiale du scanner à comptage photonique (*Courtoisie iconographie par Siemens Healthineers*). Cas clinique d'un patient de 77 ans coronarien connu, pris en charge il y a trois ans pour un SCA ST+ antérieur et revascularisé sur l'IVA proximale. Depuis dix jours, le patient récidive une douleur d'angor atypique. Un coroscanner est réalisé avec un scanner à comptage photonique NAEOTOM Alpha® (*Siemens Healthineers*). La très grande résolution spatiale de l'examen permet de visualiser un espace intrastent sans reténose intrastent avec un stent parfaitement perméable.

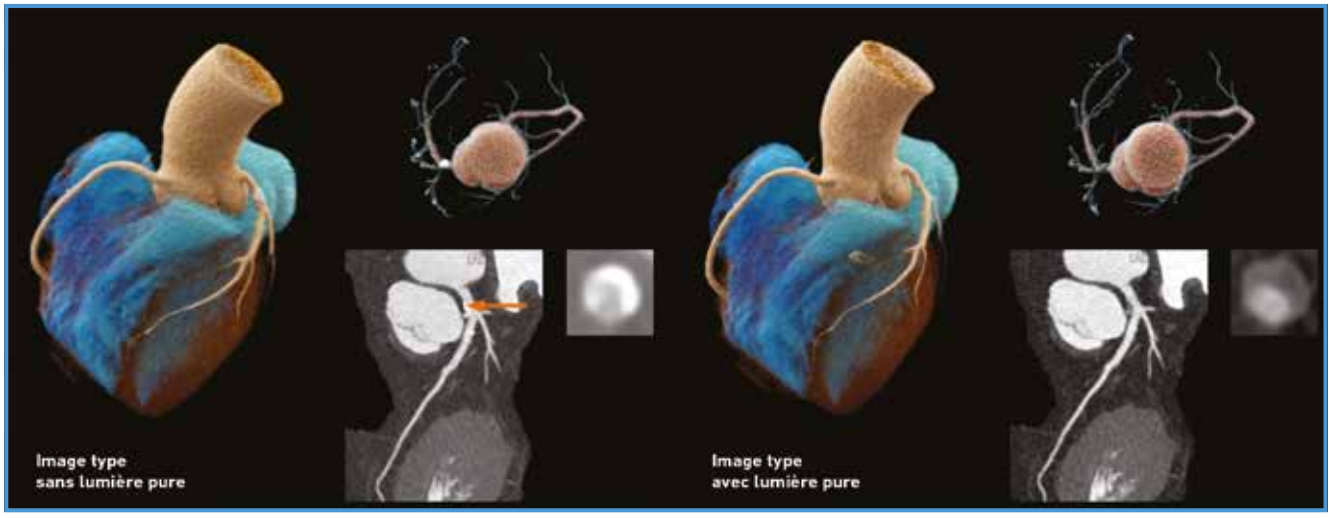

Fig. 7 : Principe de l'algorithme de soustraction des calcifications coronaires sur scanner à comptage photonique (*Courtoisie iconographie par Siemens Healthineers*). Cas clinique d'un patient de 52 ans diabétique avec une sténose calcifiée du tronc commun (TC) réalisé avec un scanner à comptage photonique NAEOTOM Alpha® (*Siemens Healthineers*). On visualise sur l'image de gauche (native) la présence d'une sténose coronaire calcifiée au niveau du TC. Puis, sur l'image de droite on applique un algorithme de soustraction des calcifications coronaires (*Pure Lumen, Siemens Healthineers*) qui supprime complètement l'image des calcifications. Cela permet de diminuer l'impact des artéfacts au contact des calcifications et donc améliore l'interprétation de ce coroscanner.

contraste sur bruit amélioré, ainsi qu'une dose de rayonnement plus faible. En effet, avec une qualité d'image meilleure et une résolution spatiale largement supérieure, ces nouveaux scanners permettent une réduction de dose estimée à 30 % [12-14].

Pour la réalisation du coroscanner, l'augmentation de la résolution spatiale est absolument cruciale pour améliorer encore la performance diagnostique au niveau de la coronaire [15]. En effet, plusieurs avantages sont mis en avant avec ces nouveaux scanners :
– amélioration de l'analyse intrastent chez un patient déjà porteur d'un stent coronaire pour évaluer la reténose intrastent (***fig. 6***) ;
– possibilité d'utiliser des algorithmes de soustraction des calcifications coronaires (***fig. 7***) ;
– analyse possible des plus petites artères coronaires et des branches de coronaires (septales, diagonales, marginales…) ;
– amélioration de l'identification des plaques vulnérables avec une meilleure visualisation de la plaque coronaire et de sa composition.

Conclusion

Le monde de l'imagerie cardiovasculaire multimodale est encore et toujours en plein bouleversement par une pluie d'innovations technologiques. En effet, IRM et scanner cardiaques deviennent des outils indispensables au quotidien pour la prise en charge de nos patients.

Alors que l'accès à l'IRM cardiaque reste encore trop limité à l'échelle nationale, les données d'Evidence based medicine sur l'impact de ces examens pour nos patients augmentent un peu plus chaque année.

BIBLIOGRAPHIE

1. Pezel T, Venkatesh BA, De Vasconcellos HD *et al.* Left Atrioventricular Coupling Index as a Prognostic Marker of Cardiovascular Events: The MESA Study. Hypertension, 2021;78:661-671.
2. Pezel T, Ambale-Venkatesh B, Quinaglia T *et al.* Change in Left Atrioventricular Coupling Index to Predict Incident Atrial Fibrillation: The Multi-Ethnic Study of Atherosclerosis (MESA). *Radiology*, 2022;303:317-326.
3. Meucci MC, Fortuni F, Galloo X *et al.* Left atrioventricular coupling index in hypertrophic cardiomyopathy and risk of new-onset atrial fibrillation. *Int J Cardiol*, 2022;363:87-93.
4. Pezel T, Sanguineti F, Garot P *et al.* Machine-Learning Score Using Stress CMR for Death Prediction in Patients With Suspected or Known CAD. JACC: *Cardiovascular Imaging*, 2022; 878:341-342.
5. Knight DS, Kotecha T, Martinez-Naharro A *et al.* Cardiovascular magnetic resonance-guided right heart catheterization in a conventional CMR environment - predictors of procedure success and duration in pulmonary artery hypertension. *J Cardiovasc Magn Reson*, 2019;21:57.
6. Rogers T, Lederman RJ. Interventional CMR: Clinical applications and future directions. *Curr Cardiol Rep*, 2015; 17:31.
7. Pezel T, Hovasse T, Lefevre T *et al.* Prognostic Value of Stress CMR in Symptomatic Patients With Coronary Stenosis on CCTA. JACC: Cardiovascular Imaging, 2022;15:1408-1422.
8. Schmermund A, Eckert J, Schmidt M *et al.* Coronary computed tomography angiography: a method coming of age. *Clin Res Cardiol*, 2018;107:40-48.
9. Chinnaiyan Km, Safian Rd, Gallagher ML *et al.* Clinical Use of CT-Derived FractionalFlowReserveintheEmergency Department. *JACC Cardiovasc Imaging*, 2020;13:452-461.
10. Driessen RS, Danad I, Stuijfzand WJ *et al.* Comparison of Coronary Computed Tomography Angiography, Fractional Flow Reserve, and Perfusion Imaging for Ischemia Diagnosis. *J Am Coll Cardiol*, 2019;73:161-173.
11. Stuijfzand WJ, Rosendael AR Van, Lin FY *et al.* Stress Myocardial Perfusion Imaging *vs* Coronary Computed Tomographic Angiography for Diagnosis of Invasive Vessel-Specific Coronary Physiology: Predictive Modeling Results From the Computed Tomographic Evaluation of Atherosclerotic Determinants of Myocardial Ischemia (CREDENCE) Trial. *JAMA Cardiol*, 2020; 5:1338-1348.
12. Kwan AC, Pourmorteza A, Stutman D *et al.* Next-Generation Hardware Advances in CT: Cardiac Applications. *Radiology*, 2021;298:3-17.
13. Danad I, Fayad ZA, Willemink MJ *et al.* New Applications of Cardiac Computed Tomography: Dual-Energy, Spectral, and Molecular CT Imaging. J*ACC Cardiovasc Imaging*, 2015;8:710-723.
14. Rajendran K, Petersilka M, Henning A *et al.* First Clinical Photon-counting Detector CT System: Technical Evaluation. *Radiology*, 2022;303:130-138.
15. Sandfort V, Persson M, Pourmorteza A *et al.* Spectral photon-counting CT in cardiovascular imaging. *J Cardiovasc Comput Tomogr*, 2021;15:218-225.

L'auteur a déclaré ne pas avoir de liens d'intérêts concernant les données publiées dans cet article.