

L'année cardiologique

Quoi de neuf en imagerie cardiovasculaire ?



T. PEZEL¹, J. GAROT²

¹ Département d'imagerie cardiovasculaire, Johns Hopkins Hospital, BALTIMORE, ÉTATS-UNIS.

² Institut Cardiovasculaire Paris Sud, MASSY.

L'imagerie cardiovasculaire multimodale est en plein développement ces dernières années à travers les dernières recommandations, dans les articles de recherche récemment publiés et surtout dans notre pratique quotidienne.

Selon un sondage récent réalisé par le Collège des Cardiologues en Formation (CCF, le groupe des jeunes de la Société Française de Cardiologie), l'imagerie cardiovasculaire multimodale serait la spécialité la plus désirée par nos jeunes collègues, devant la cardiologie interventionnelle ou la rythmologie. Ainsi, cet attrait pour l'imagerie cardiovasculaire s'explique notamment par son rôle de plus en plus important pour stratifier le risque de nos patients et pour ensuite adapter au mieux notre prise en charge !

L'imagerie est au cœur de ce que nos amis anglo-saxons appellent le “*decision making*” et nous allons revenir ensemble sur les nouveautés de cette discipline en 2020.

IRM cardiaque

1. Recommandations ESC 2020 : IRM cardiaque systématique pour l'évaluation des MINOCA (classe I)

Incontestablement, le temps fort de cette année 2020 pour l'IRM cardiaque est cette recommandation ESC 2020 dédiée aux syndromes coronaires aigus sans sus-décalage du ST (NSTEMI). Elle fait progresser l'IRM cardiaque avec une “**indication systématique d'IRM cardiaque pour tous les patients avec MINOCA sans cause évidente**” (classe IB) [1].

Mais, pour comprendre tout l'enjeu de cette recommandation, il est important de rappeler au préalable à quoi correspond un MINOCA, concept assez récent dans la littérature. En effet, MINOCA signifie *myocardial infarction with non-obstructive coronary arteries*, littéralement “infarctus du myocarde à coronaires saines”. Cependant, dans la littérature et dans ces recommandations, la définition de MINOCA est en réalité plus subtile car elle équivaut à un diagnostic transitoire posé chez un patient ayant un tableau compatible de syndrome coronaire aigu mais sans sténose coronaire significative à la coronarographie [2]. Ainsi, comme l'évoquent certains experts, il s'agit plutôt d'un “*diagnostic in progress*” (en cours d'évaluation) que d'un diagnostic final.

Devant un patient présentant un MINOCA, les trois principaux diagnostics étiologiques que l'on pourra évoquer seront : la myocardite, l'infarctus à coronaires saines ou le syndrome de Tako-tsubo [2]. Les recommandations de l'ESC exigent maintenant une IRM cardiaque systématique car, dans ces trois cas, le seul examen capable de faire le diagnostic final est l'IRM cardiaque ! En effet, il est important de rappeler que les conséquences en termes de prise en charge de ces diagnostics portés par l'IRM sont majeures : évaluation et prévention du risque rythmique en cas de myocardite ; bilan étiologique d'une thrombophilie ou maladie auto-immune avec parfois indication à une anticoagulation orale à vie, en cas d'infarctus à coronaires saines ; ou encore suivi rapproché d'un patient à risque de récurrence en cas de syndrome de Tako-tsubo.

Enfin, il est possible d'aller encore plus loin dans la technique IRM au profit du patient avec le développement de nouvelles séquences IRM de plus en plus sensibles, utiles pour le diagnostic des petits infarctus à coronaires saines par exemple. Ainsi, on peut citer l'article très récemment publié par l'équipe bordelaise du Pr Hubert Cochet évaluant l'intérêt d'une nouvelle séquence de réhaussement tardif haute résolution 3D [3]. Dans cette étude évaluant 229 patients avec MINOCA ayant un résultat d'IRM standard “normal” ou “non concluant”, l'utilisation de cette nouvelle séquence IRM a permis de modifier le diagnostic final dans 26 % des cas (**fig. 1**) ! Ce résultat impressionnant et très prometteur est à contrebalancer avec une durée d'acquisition de la séquence plus longue (environ 10 minutes comparé à 3 à 6 minutes pour la séquence d'IRM conventionnelle).

2. Excellente valeur pronostique à long terme et meilleur rapport coût/efficacité de l'IRM de stress pour le dépistage de la maladie coronaire

Cette année 2020 est aussi marquée par la publication d'une série d'études de grande qualité, issues du registre américain SPINS, évaluant la valeur pronostique et le rapport coût/efficacité de l'IRM de stress chez 2 349 patients avec douleur

L'année cardiologique

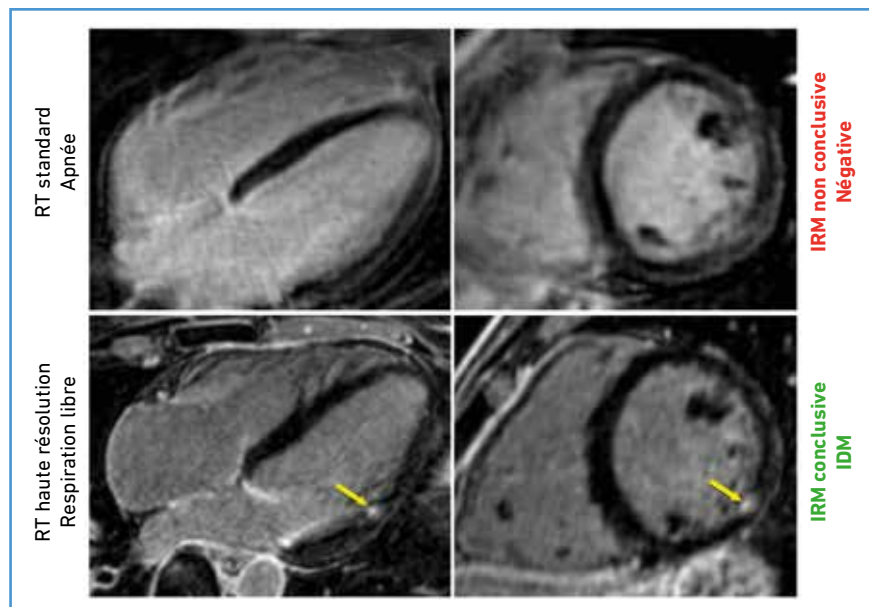


Fig. 1 : Exemple d'un patient avec un diagnostic de MINOCA évalué avec une séquence standard de rehaussement tardif (panel du haut) et une séquence 3D haute résolution de rehaussement tardif (panel du bas) (courtoisie Pr Hubert Cochet, CHU/IHU de Bordeaux). Dans cet exemple issu de la cohorte bordelaise [3], on peut observer que la séquence de rehaussement tardif standard est strictement normale (panel du haut), alors que la séquence 3D haute résolution permet de mettre en évidence la présence d'un infarctus à coronaires saines inféro-latéral par un rehaussement tardif punctiforme sous-endocardique (flèches jaunes, panel du bas).

thoracique au sein de 13 centres [4]. Ainsi, Kwong *et al.* ont montré qu'une stratégie diagnostique reposant sur l'IRM de stress offrait une excellente valeur prédictive négative en l'absence de présence d'une ischémie inducible avec un taux annuel d'événements cardiovasculaires < 1 % [4].

Sur le plan coût/efficacité, une étude ancillaire de SPINS a montré que les patients évalués par IRM de stress présentaient un coût moyen plus bas lors du suivi, comparé à une autre stratégie non invasive par imagerie nucléaire ou comparé à une stratégie invasive avec coronarographie d'emblée [5].

Dans une autre étude issue du registre SPINS, Antiochos *et al.* ont montré que la découverte d'un infarctus non connu lors de l'IRM cardiaque avait exactement la même valeur pronostique qu'un infarctus du myocarde connu et traité [6] (fig. 2). De plus, cette valeur pronostique similaire de l'infarctus, qu'il soit connu ou inconnu, restait significative

de façon indépendante après ajustement sur de nombreux facteurs incluant la présence d'une ischémie myocardique lors du stress. Cela renforce le message que la découverte fortuite d'un infarctus du myocarde lors d'un examen d'IRM

doit entraîner les mêmes mesures de prise en charge que pour un patient qui aurait fait un infarctus du myocarde symptomatique.

Enfin, d'autres équipes ont montré une valeur pronostique de l'IRM de stress importante dans certaines populations très particulières du quotidien comme les patients très âgés > 75 ans sans maladie coronaire connue [7] ou chez les insuffisants cardiaques avec une FEVG réduite < 40 % parfois difficile à évaluer [8].

3. L'IRM cardiaque de demain sera aussi interventionnelle !

Le principe de l'IRM interventionnelle est d'utiliser l'IRM cardiaque pour guider certains gestes invasifs comme le cathétérisme cardiaque droit ou encore l'ablation de flutter, de fibrillation auriculaire ou de tachycardie ventriculaire [9]. L'intérêt pour le patient est avant tout de supprimer le risque d'exposition aux rayons, mais surtout de visualiser et cibler précisément le substrat à ablater et de contrôler l'efficacité du geste d'ablation. En effet, l'IRM offre des mesures précises de la fonction cardiaque, des volumes, ainsi qu'une excellente caractérisation du tissu myocardique permet-

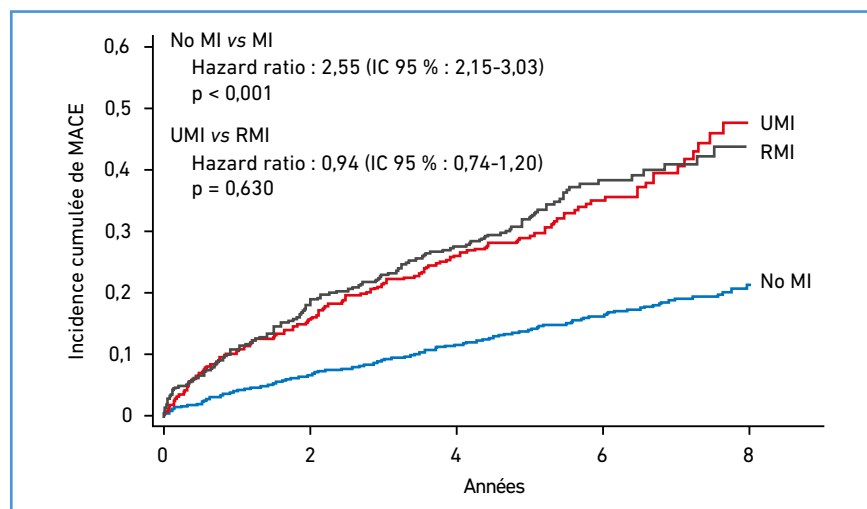


Fig. 2 : Courbes de survie de Kaplan-Meier comparant les patients sans infarctus ("No MI"), avec un infarctus non connu de découverte fortuite ("UMI") et les infarctus connus (RMI) (d'après Antiochos *et al.* [6]). La valeur prédictive d'un infarctus du myocarde est similaire sur la survenue des MACE (mortalité cardiovasculaire ou récurrence d'un infarctus du myocarde) que cet infarctus soit connu ou de découverte fortuite ($p = 0,63$).

tant d'identifier précisément l'œdème et la nécrose myocardiques créés par l'ablation, offrant une "vérification tissulaire" du geste d'ablation [10].

Cependant, si toute cette théorie de l'IRM interventionnelle semble très attractive, il existe diverses contraintes techniques à sa mise en place : à commencer par l'obtention d'un **matériel IRM compatible**, avec un coût aujourd'hui encore très élevé [10].

Les progrès de la technologie et la volonté des grandes équipes internationales travaillant sur le sujet permettront probablement dans un avenir proche de proposer cette technique plus largement

afin d'améliorer encore davantage l'efficacité des techniques de cardiologie interventionnelle.

4. Place de l'IRM cardiaque dans l'évaluation des lésions chroniques de la COVID-19

Nous vivons actuellement une période de pandémie, au cours de laquelle l'IRM cardiaque a d'abord joué un **rôle clé dans le diagnostic de myocardite à COVID-19** à la phase aiguë de la maladie [11] (**fig. 3**). Puis, l'IRM cardiaque joue aujourd'hui un rôle dans **l'évaluation chronique des patients après une infection à SARS-CoV-2**. En effet, une étude alle-

mande récemment publiée dans *JAMA Cardiology* a montré, chez 100 patients avec antécédent récent de COVID-19, la persistance de lésions cardiaques dans 78 % des cas et d'une inflammation persistante dans 60 % des cas, et cela indépendamment de la gravité initiale de la maladie ou du délai à partir du diagnostic initial [12]. Cependant, ces résultats doivent être pris avec précaution au moment de la lecture de cet article, car l'IRM cardiaque était réalisée seulement 1 mois environ après le diagnostic de COVID-19. Autrement dit, cette évaluation était réalisée une semaine, au mieux une quinzaine de jours, après la guérison des patients et donc probablement

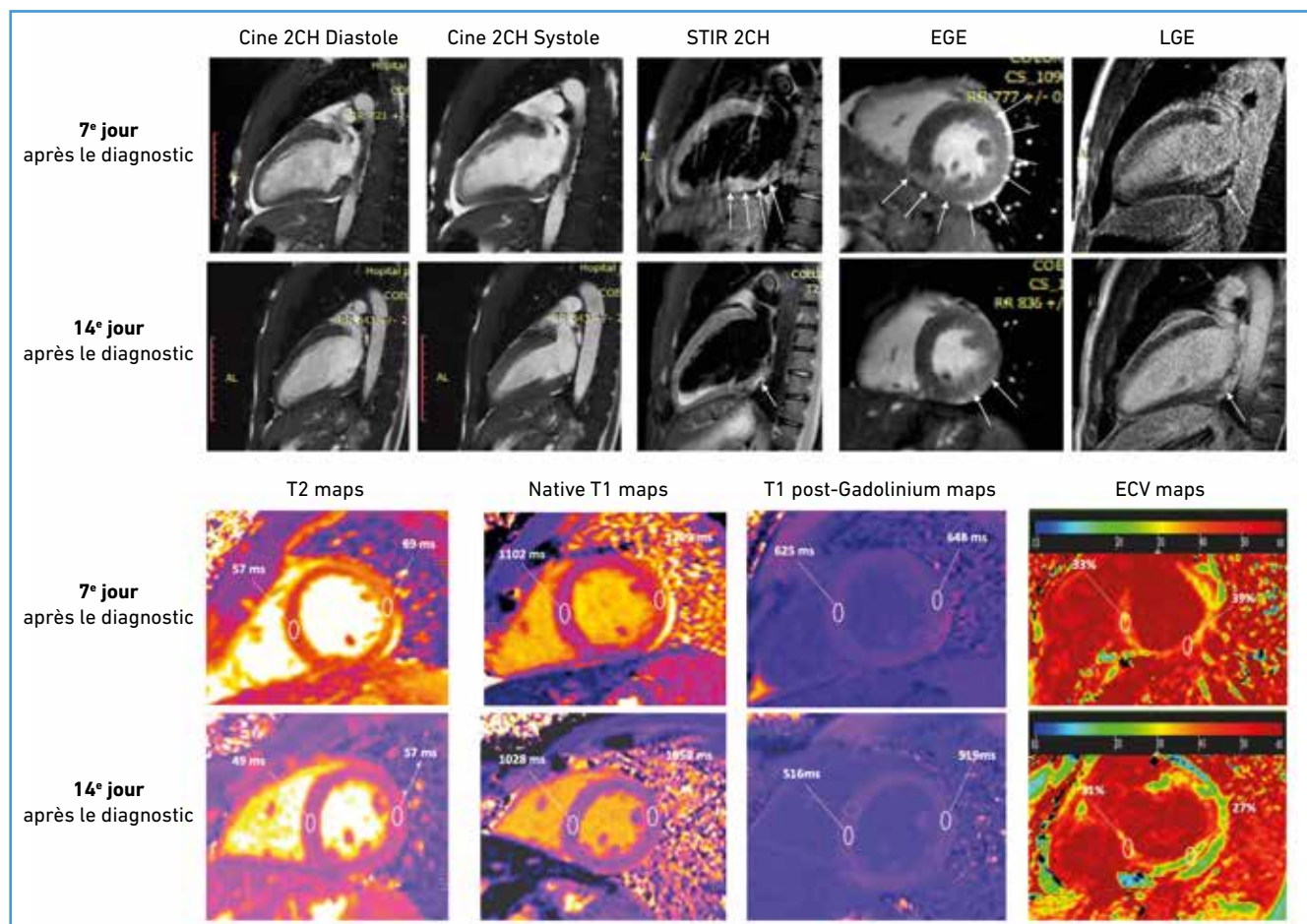


Fig. 3 : Patient de 18 ans avec myocardite fulminante à COVID-19 compliquée d'une altération sévère de la FEVG (7^e jour, **panels du haut**) et qui a présenté une récupération complète en 1 semaine (14^e jour, **panels du bas**) (d'après Garot *et al.* [11]). Sur la première IRM cardiaque réalisée au 7^e jour, on note la présence d'un œdème myocardique visible sur les séquences de rehaussement tardif et de STIR (**flèches blanches, panel du haut**), associée à une augmentation du T1 mapping natif et du volume extracellulaire (ECV). Lors de la seconde IRM réalisée au 14^e jour, on décrit une diminution importante de l'ensemble des signes IRM d'activité de la myocardite (régression de l'œdème en STIR, mais persistance du rehaussement tardif) avec une normalisation de la FEVG.

L'année cardiologique

pas avec assez à distance pour parler de lésions chroniques. Des études complémentaires devront être réalisées.

5. Le coup de tonnerre dans le monde de l'imagerie en 2020 : rétractation de deux papiers du JACC pour falsification de données !

Nous avons déjà parlé de ces deux articles dans des numéros précédents et il nous semblait donc capital de revenir sur cette controverse majeure. En effet, l'équipe d'Oxford (Grande-Bretagne) a présenté depuis 2018 plusieurs articles sur la notion de "T1 mapping réalisé sous stress" permettant la distinction entre maladie microvasculaire et maladie coronaire obstructive. Les résultats plus que spectaculaires (*presque trop beaux*) avaient soulevé de nombreuses questions au sein de notre communauté.

Début septembre 2020, le *JACC* met probablement fin à cette discussion en annonçant la **rétractation de deux articles princeps** [13, 14] et d'un **éditorial** [15] publiés par la même équipe sur ce sujet. La raison évoquée est la falsification de figures IRM et des résultats, ainsi que la falsification des analyses statistiques entre les groupes. La notion de T1 mapping sous stress est donc plus que remise en question et des études ultérieures devront être réalisées pour trancher enfin cette problématique.

6. IRM cardiaque de perfusion quantitative

Le T1 mapping au stress semble donc plus que mal en point, mais rassurons-nous car une autre technique en cours de développement depuis des années au sein de différentes équipes se propose aussi de distinguer "maladie microvasculaire" et "maladie coronaire obstructive". Cette technique, c'est l'IRM cardiaque de perfusion quantitative !

Décrite depuis longtemps comme un outil de diagnostic de la maladie coronaire obstructive, l'IRM cardiaque de per-

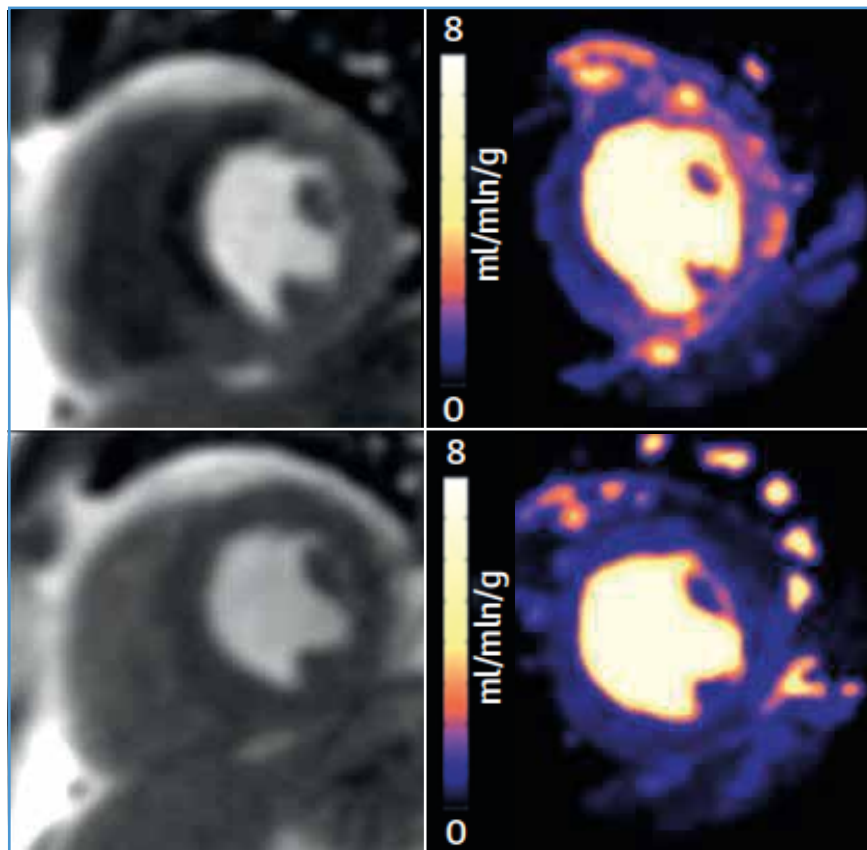


Fig. 4 : Exemple de cartographie quantitative de perfusion avec flux de perfusion myocardique (*myocardial blood flow – MBF*) (Courtoisie Pr. Peter Kellman, National Institute of Health, États-Unis). Image de perfusion myocardique traditionnelle (**image de gauche**) et cartographie quantitative de perfusion par MBF (**image de droite**) avec sur le panel du haut, un patient présentant un défaut de perfusion myocardique septal, et sur le **panel du bas** un patient sain.

sion "semi-quantitative" après injection d'un vasodilatateur permet de révéler une sténose coronaire significative. En effet, le principe est de détecter visuellement un défaut sous-endocardique de perfusion lors de l'injection du gadolinium. Cependant, cette technique ne permet pas d'évaluer les anomalies de la microcirculation coronaire, notamment chez les patients diabétiques et/ou hypertendus.

Et c'est justement là que l'IRM de perfusion "quantitative" nous offre la possibilité d'aller encore plus loin en proposant une véritable **cartographie quantitative de perfusion** [16] (**fig. 4**). Ainsi, cette nouvelle approche en cours de validation sur de grandes études internationales, pourrait nous permettre d'imaginer dépasser les limites de la perfusion semi-quantitative évoquées plus haut.

Lorsque l'on connaît la place nouvelle de "l'angor microvasculaire" dans les dernières recommandations de l'ESC 2019, on peut imaginer un développement important de cette technique non invasive permettant la détection des anomalies de la microcirculation coronaire de façon robuste [17].

Scanner cardiaque

1. Les recommandations ESC 2019 sur la place du coroscaner dans l'angor stable

Le coroscaner prend une place de plus en plus importante dans les dernières recommandations ESC pour le diagnostic de maladie coronaire chronique (**tableau I**) [18]. En effet, les recomman-

Recommandations ESC 2019 : coroscanner et angor stable	Classe
La réalisation d'un test d'ischémie non invasif ou d'un coroscanner est recommandée comme test initial pour diagnostiquer la maladie coronaire chez les patients symptomatiques chez lesquels le diagnostic de maladie coronaire ne peut être exclu par la seule évaluation clinique.	I
La réalisation d'un test d'ischémie non invasif est recommandée si le coroscanner montre la présence d'une sténose coronaire avec un retentissement fonctionnel incertain.	I
Le coroscanner doit être considéré comme une alternative à la coronarographie si un autre test d'ischémie non invasif est non concluant .	IIa
Le coroscanner n'est pas recommandé en cas de calcifications coronaires étendues , de fréquence cardiaque irrégulière , d' obésité sévère , d' incapacité à coopérer avec les commandes d'apnée ou toute autre condition rendant une bonne qualité d'image peu probable.	III

Tableau I : Place du coroscanner dans l'angor stable selon les recommandations ESC 2019 (traduit et adapté de Knuuti *et al.* [18]).

dations proposent de privilégier le coroscanner pour le bilan initial d'un patient symptomatique suspect de maladie coronaire chronique si :

- **probabilité faible de maladie coronaire** devant une douleur atypique chez un patient à faible risque cardiovasculaire (permet de potentialiser l'intérêt de l'excellente valeur prédictive négative du coroscanner) ;
- patient **sans antécédent de maladie coronaire** connu ;
- patient avec **de bons critères de qualité d'image** au scanner : mince, en rythme sinusal, coopérant avec une capacité à tenir l'apnée, pas d'antécédent de radiothérapie thoracique (risque de calcifications coronaires massives) ;

– **expertise locale en coroscanner** avec un volume important de patients et une bonne relation entre l'équipe de scanner et de coronarographie.

La **figure 5** rappelle la stratégie globale pour choisir entre coroscanner ou test d'ischémie non invasif chez un patient symptomatique avec suspicion de maladie coronaire.

2. Les recommandations ESC 2020 renforcent encore la place du coroscanner dans le syndrome coronaire aigu sans sus-décalage du ST (SCA ST-)

Dans les dernières recommandations ESC 2020, le coroscanner est indiqué comme alternative à la coronarographie devant une suspicion de SCA ST- avec probabilité clinique faible à intermédiaire (classe I) [1].

Ainsi, cette nouvelle place du coroscanner combinée avec le rôle renforcé de la troponine ultra-sensible traduit l'objectif de ces nouvelles recommandations d'exclure le plus vite possible les patients à faible risque de maladie coronaire pour libérer les services d'urgences et de soins intensifs cardiologiques (**tableau II**).

3. Scanner de perfusion de stress

Le coroscanner cardiaque connaît une période de développement incroyable permettant d'associer des **performances toujours plus importantes**

Recommandations ESC 2020 : coroscanner et SCA ST-	Classe
Le coroscanner est recommandé comme alternative à la coronarographie pour exclure un SCA quand il y a un risque faible à intermédiaire de maladie coronaire et quand troponine ultra-sensible et/ou ECG de repos sont normaux ou non conclusifs.	I

Tableau II : Place du coroscanner dans le SCA ST- selon les recommandations ESC 2020 (traduit et adapté de Collet *et al.* [1]).

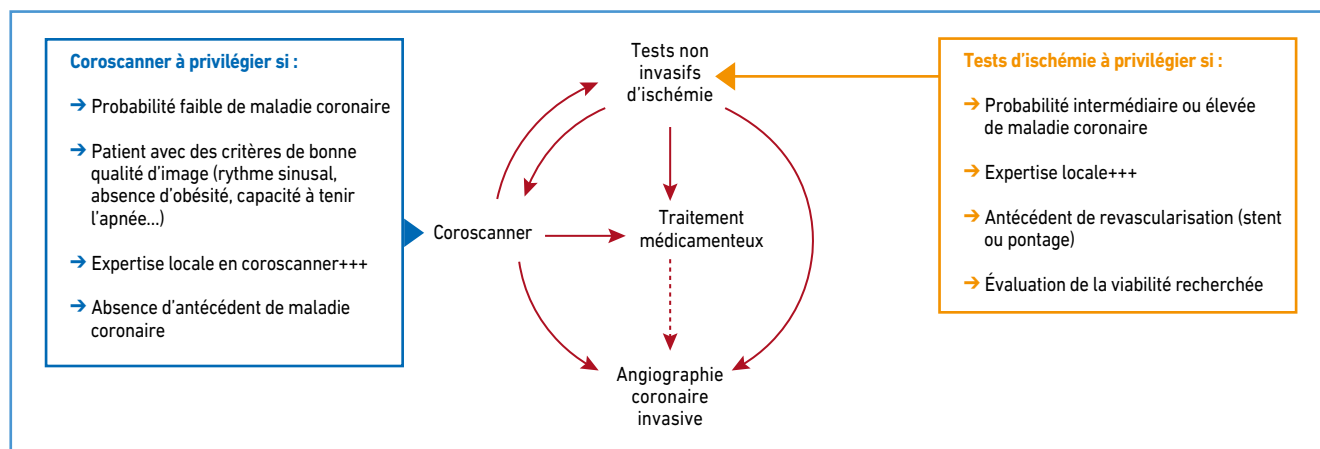


Fig. 5 : Synthèse de la stratégie diagnostique de maladie coronaire stable selon les recommandations ESC 2019 (traduit et adapté de Knuuti *et al.* [18]).

L'année cardiologique

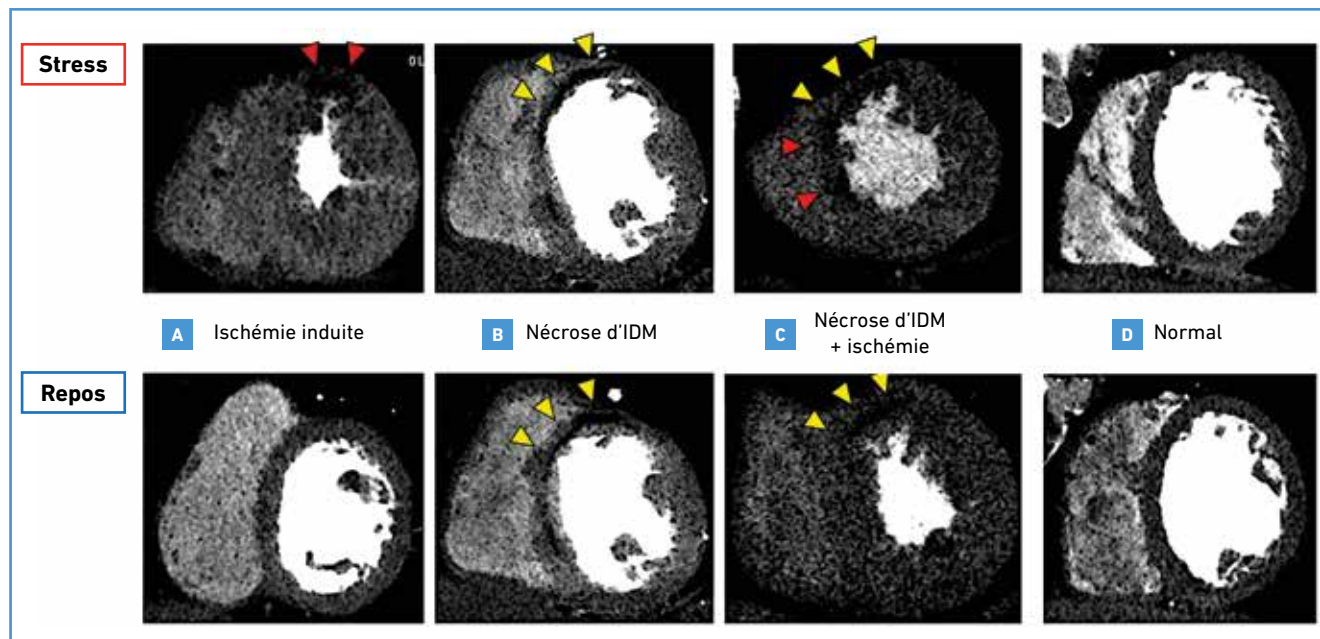


Fig. 6 : Sémiologie du scanner de perfusion au repos (**panel du bas**) et au stress après injection de vasodilatateur (**panel du haut**) (d'après S. Mushtak *et al.* [19]). **A :** Ischémie induite : hypoperfusion sous-endocardique antérieure (**têtes de flèche rouges**) sur l'acquisition de stress et aucune anomalie sur l'acquisition de repos. **B :** Nécrose d'infarctus du myocarde (IDM) : hypoperfusion sous-endocardique antéro-septale à l'identique au stress et au repos (**têtes de flèche jaunes**). **C :** Nécrose d'IDM avec ischémie péri-nécrotique : hypoperfusion sous-endocardique (voire transmurale) de la paroi antérieure présente au stress et à l'effort qui correspond à l'IDM (**têtes de flèche jaunes**) ; hypoperfusion sous-endocardique du septum présente uniquement au stress et pas au repos qui correspond à une ischémie surajoutée autour de l'IDM existant (**têtes de flèche rouges**). **D :** Normal : perfusion myocardique homogène sans anomalie de perfusion visible au repos et au stress.

tout en **réduisant de façon drastique la dose de radiations délivrée**. En effet, les améliorations permanentes des machines en termes de résolution spatiale et temporelle, permettent le développement de nouveaux outils très puissants comme le **scanner de perfusion de stress** ou la **FFR-CT**. Ainsi, au-delà du coroscaner traditionnel, les recommandations de l'ESC abordent l'existence de la possibilité du **scanner de stress** ± couplé avec la mesure d'une **FFR-CT**, suite à de récentes études de non-infériorité comparant la FFR-CT à la FFR invasive [18].

Le **scanner de perfusion** de stress réalisé après l'injection d'un vasodilatateur (adénosine, dipyridamole ou plus récemment régadénoson) permet d'obtenir des informations fonctionnelles. En effet, exactement comme l'IRM de stress, le scanner de stress permet de mettre en évidence un défaut de perfusion sous-endocardique sous vasodilatateur, traduisant une limite de réserve

coronaire que l'on peut assimiler à une ischémie myocardique induite [19]. L'intérêt est de pouvoir **associer les données anatomiques du coroscaner et les données fonctionnelles du scanner de perfusion de repos et de stress (fig. 6)**.

Une méta-analyse récente publiée par Sørgaard *et al.* incluant 1 188 patients à partir de 19 études a également montré que la performance diagnostique du scanner de perfusion était semblable à celles des autres imageries non invasives que sont l'IRM de stress et le PET-scanner comparé au test de référence par FFR invasive, avec une sensibilité de 88 % et une spécificité de 80 % [20].

4. FFR-CT

La FFR-CT est une technique utilisant des **algorithmes de traitement du signal en lien avec la physique de la mécanique des fluides appliquée aux images du coroscaner afin d'analyser quantitativement le flux coronaire** [21, 22].

En effet, le principe est d'obtenir une mesure proche de celle de la FFR traditionnelle mesurée de façon invasive.

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 [23]. Le but est de guider au mieux la revascularisation coronaire, en évitant d'être inutilement invasif, en adressant un patient en coronarographie pour une lésion non responsable de ses symptômes.

Cependant, le coroscaner 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 coroscaner et l'analyse de la plaque (*spotty* calcification, remodelage positif de la plaque, *napkin ring sign* et présence de plaque à faible atténuation < 50 UH) était supérieure à l'imagerie fonctionnelle comprenant analyse de la perfu-

sion et FFR-CT pour le diagnostic de FFR < 0,80 comme *gold standard* [24].

Finalement, on pourrait imaginer coupler le coroscaner, 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.

5. Place du scanner cardiovasculaire dans l'évaluation des patients COVID-19

Après avoir évoqué le rôle incontournable de l'IRM cardiaque pour l'évaluation de l'atteinte myocardique liée à la COVID-19, il est important d'évoquer le rôle du scanner selon les recommandations de la Société américaine de scanner cardiaque (Society of Cardiovascular Computed Tomography) [25].

Tout d'abord, il est primordial d'évoquer le rôle du scanner thoracique non injecté dans le diagnostic positif de COVID-19, avec des performances supérieures à celle de la RT-PCR comme cela a été montré notamment dans cette étude française menée par nos collègues radiologues [26]. De plus, le scanner thoracique injecté permet d'éliminer le diagnostic d'embolie pulmonaire devant tout état respiratoire grave sans atteinte pulmonaire sévère permettant d'expliquer la sévérité du tableau. En effet, la prévalence de l'embolie pulmonaire a été évaluée à 8,3 % des patients hospitalisés [27].

Par ailleurs, certaines études ont été très récemment publiées sur le **potentiel rôle du score calcique coronaire** dans la stratification du risque de sévérité de la COVID-19. En effet, Dillinger *et al.* ont montré que plus le score calcique évalué sur le scanner thoracique est élevé et plus le risque de ventilation mécanique, d'ECMO ou de décès est important [28].

Conclusion

Nous vivons une période d'innovation sans précédent dans le monde de l'imagerie cardiovasculaire multimodale, et tout particulièrement de l'IRM et du scanner cardiaques : véritables bras armés d'une cardiologie non invasive toujours plus précoce pour nos patients, tant sur le plan préventif que curatif.

À l'instar du diagnostic de maladie coronaire, on peut se demander si la coronarographie telle qu'on l'appréhende actuellement ne se limitera pas dans un futur proche uniquement aux gestes thérapeutiques d'angioplastie coronaire ou de remplacement valvulaire...

En effet, l'année dernière, les recommandations de l'ESC 2019 mettaient en avant le coroscaner et les tests d'ischémie non invasifs comme l'IRM de stress, pour la stratégie diagnostique de maladie coronaire chronique. Cette année, les recommandations ESC 2020 frappent fort en indiquant la réalisation d'une IRM cardiaque systématique pour tous les patients avec diagnostic de MINOCA avec une classe I.

À l'image de ces recommandations, l'imagerie multimodale, de plus en plus présente dans notre quotidien, joue un rôle de plus en plus crucial et décisif dans la prise de décision des cliniciens.

BIBLIOGRAPHIE

- COLLET JP, THIELE H, BARBATO E *et al.* 2020 ESC Guidelines for the management of acute coronary syndromes in patients presenting without persistent ST-segment elevation. *Eur Heart J*, 2020 [online ahead of print].
- PASUPATHY S, AIR T, DREYER RP *et al.* Systematic review of patients presenting with suspected myocardial infarction and nonobstructive coronary arteries. *Circulation*, 2015;131:861-870.
- LINTINGRE PF, NIVET H, CLÉMENT-GUINAUDEAU S *et al.* High-Resolution late gadolinium enhancement magnetic resonance for the diagnosis of myocardial infarction with nonobstructed coronary arteries. *JACC Cardiovasc Imaging*, 2020;13:1135-1148.
- KWONG RY, GE Y, STEEL K *et al.* Cardiac magnetic resonance stress perfusion imaging for evaluation of patients with chest pain. *J Am Coll Cardiol*, 2019;74:1741-1755.
- GE Y, PANDYA A, STEEL K *et al.* Cost-effectiveness analysis of stress cardiovascular magnetic resonance imaging for stable chest pain syndromes. *JACC Cardiovasc Imaging*, 2020;13:1505-1517.
- ANTIOCHOS P, GE Y, STEEL K *et al.* Imaging of clinically unrecognized myocardial fibrosis in patients with suspected coronary artery disease. *J Am Coll Cardiol*, 2020;76:945-957.
- PEZEL T, SANGUINETI F, KINNEL M *et al.* Prognostic value of dipyridamole stress perfusion cardiovascular magnetic resonance in elderly patients >75 years with suspected coronary artery disease. *Eur Heart J Cardiovasc Imaging*, 2020 [online ahead of print].
- PEZEL T, SANGUINETI F, KINNEL M *et al.* Safety and prognostic value of vasodilator stress cardiovascular magnetic resonance in patients with heart failure and reduced ejection fraction. *Circ Cardiovasc Imaging*, 2020;13:e010599.
- KNIGHT DS, KOTCHA 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.
- ROGERS T, LEDERMAN RJ. Interventional CMR: Clinical applications and future directions. *Curr Cardiol Rep*, 2015;17:31.
- GAROT J, AMOUR J, PEZEL T *et al.* SARS-CoV-2 Fulminant myocarditis. *JACC Case Rep*, 2020;2:1342-1346.
- PUNTMANN VO, CARERJ ML, WIETERS I *et al.* Outcomes of cardiovascular magnetic resonance imaging in patients recently recovered from Coronavirus Disease 2019 (COVID-19). *JAMA Cardiol*, 2020;e203557.
- LIU A, WIJESURENDRA RS, LIU JM *et al.* RETRACTED: Diagnosis of microvascular angina using cardiac magnetic resonance. *J Am Coll Cardiol*, 2018;71:969-979.
- LIU A, WIJESURENDRA RS, LIU JM *et al.* Gadolinium-free cardiac MR stress T1-mapping to distinguish epicardial from microvascular coronary disease. *J Am Coll Cardiol*, 2018;71:957-968.

L'année cardiologique

15. KARAMITSOS TD. RETRACTED: Mapping the future of myocardial ischemia testing with cardiac magnetic resonance. *J Am Coll Cardiol*, 2018;71:980-982.
16. KOTECHE T, MARTINEZ-NAHARRO A, BOLDRINI M *et al*. Automated pixel-wise quantitative myocardial perfusion mapping by CMR to detect obstructive coronary artery disease and coronary microvascular dysfunction: validation against invasive coronary physiology. *JACC Cardiovasc Imaging*, 2019; 12: 1958-1969.
17. KNOTT KD, SERAPHIM A, AUGUSTO JB *et al*. The prognostic significance of quantitative myocardial perfusion: an artificial intelligence-based approach using perfusion mapping. *Circulation*, 2020;141:1282-1291.
18. KNUUTI J, WIJNS W, SARASTE A *et al*. 2019 ESC Guidelines for the diagnosis and management of chronic coronary syndromes. *Eur Heart J*, 2020;41:407-477.
19. MUSHTAQ S, CONTE E, PONTONE G *et al*. State-of-the-art-myocardial perfusion stress testing: Static CT perfusion. *J Cardiovasc Comput Tomogr*, 2020; 14:294-302.
20. SØRGAARD MH, KOFOED KF, LINDE JJ *et al*. Diagnostic accuracy of static CT perfusion for the detection of myocardial ischemia. A systematic review and meta-analysis. *J Cardiovasc Comput Tomogr*, 2016;10:450-457.
21. SCHMERMUND A, ECKERT J, SCHMIDT M *et al*. Coronary computed tomography angiography: a method coming of age. *Clin Res Cardiol*, 2018;107:40-48.
22. CHINNAIYAN KM, SAFIAN RD, GALLAGHER ML *et al*. Clinical use of CT-derived fractional flow reserve in the emergency department. *JACC Cardiovasc Imaging*, 2020;13:452-461.
23. 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.
24. STUIJFZAND WJ, VAN ROSENDAEL AR, 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;e203409.
25. CHOI AD, ABBARA S, BRANCH KR *et al*. Society of Cardiovascular Computed Tomography guidance for use of cardiac computed tomography amidst the COVID-19 pandemic Endorsed by the American College of Cardiology. *J Cardiovasc Comput Tomogr*, 2020; 14: 101-104.
26. HERPE G, LEDERLIN M, NAUDIN M *et al*. Efficacy of chest CT for COVID-19 pneumonia in France. *Radiology*, 2020; 202568.
27. FAUVEL C, WEIZMAN O, TRIMAILLE A *et al*. Pulmonary embolism in COVID-19 patients: a French multicentre cohort study. *Eur Heart J*, 2020;41:3058-3068.
28. DILLINGER J-G, BENMESSAOUD FA, PEZEL T *et al*. Coronary artery calcification and complications in patients with COVID-19. *JACC Cardiovasc Imaging*, 2020;13:2468-2470.

Les auteurs ont déclaré ne pas avoir de conflits d'intérêts concernant les données publiées dans cet article.