



HAL
open science

Rôle de l'imagerie dans l'insuffisance cardiaque

Émilie Bollache, Khaoula Bouazizi, Sébastien Salles, Fabrizio Andreelli, Élie Mousseaux, Jérôme Lamy, Nadja Kachenoura

► **To cite this version:**

Émilie Bollache, Khaoula Bouazizi, Sébastien Salles, Fabrizio Andreelli, Élie Mousseaux, et al..
Rôle de l'imagerie dans l'insuffisance cardiaque. Médecine des Maladies Métaboliques, 2025,
10.1016/j.mmm.2025.01.008 . hal-04914705

HAL Id: hal-04914705

<https://hal.science/hal-04914705v1>

Submitted on 27 Jan 2025

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Cardiac imaging in heart failure

Rôle de l'imagerie dans l'insuffisance cardiaque

Emilie Bollache¹, Khaoula Bouazizi^{1,2}, Sébastien Salles¹, Fabrizio Andreelli³, Elie Mousseaux⁴, Jérôme Lamy⁴, Nadja Kachenoura¹

¹Sorbonne Université, CNRS, INSERM, Laboratoire d'Imagerie Biomédicale, LIB, Paris, France

²Institut de Cardiométabolisme et Nutrition (ICAN), Paris, France

³Sorbonne Université, NutriOmics, INSERM, Paris, France.

⁴Hôpital européen Georges-Pompidou, Cardiovascular Research Center (PARCC, Inserm U970), Paris, France

Adresse pour correspondance :

Nadjia Kachenoura, PhD

Responsable de l'Équipe d'Imagerie Cardiovasculaire/Head of Cardiovascular Imaging

Laboratoire d'Imagerie Biomédicale

CNRS UMR 7371 - INSERM U1146 - Sorbonne Université UM CR2

Campus des Cordeliers

15 rue de l'Ecole de Médecine, 75006 PARIS (France)

Email : nadjia.kachenoura@inserm.fr

Résumé

L'évaluation de l'insuffisance cardiaque (IC) repose sur un ensemble de tests et d'examens parmi lesquels l'imagerie non-invasive tient un rôle prépondérant. L'échocardiographie est l'examen d'imagerie cardiaque de première intention alors que l'IRM (Imagerie par Résonance Magnétique) se positionne en seconde ligne dans l'IC, du fait qu'elle soit moins disponible, moins économique et plus complexe à mettre en œuvre. Une panoplie de mesures dont la valeur diagnostique et pronostique dans l'IC a été démontrée, est rendue accessible par ces modalités d'imagerie, comprenant des indices de géométrie, volumétrie, fonction systolique dont la fraction d'éjection (FE) est référence et permet de stratifier le degré d'atteinte de l'IC, et vitesses de remplissage ventriculaires, à la fois dans le cœur gauche et le cœur droit. La déformation myocardique qui serait plus robuste que la FE conventionnelle pour détecter des atteintes subtiles puisqu'elle est souvent altérée dans l'IC à FE préservée, est notamment de plus en plus reconnue. Bien que l'échocardiographie 3D améliore aujourd'hui la précision des mesures volumétriques par rapport aux techniques 2D, un avantage de l'IRM réside dans ses excellentes résolution spatiale et couverture anatomique, la propulsant ainsi comme la méthode de référence pour l'évaluation des volumes du ventricule gauche (VG) et donc de la FE VG, ainsi que de la masse VG, les volumes et la fonction du ventricule droit. L'IRM offre par ailleurs un moyen unique d'explorer les modifications structurelles du myocarde, telles que l'étude de la fibrose focale de remplacement (rétention tardive après injection d'un produit de contraste gadoliné), la fibrose diffuse interstitielle et le volume extra-cellulaire (cartographies T1 acquises pré- et post-injection), et la perfusion myocardique réalisée au premier passage du produit de contraste. Enfin, le scanner cardiaque est utilisé pour évaluer le score calcique coronaire et la présence de sténoses, après injection d'un produit de contraste afin d'exclure l'existence d'une cardiopathie ischémique, ainsi que les volumes cardiaques, les lésions d'hypoperfusion et la fibrose (de remplacement et interstitielle) myocardiques. Les nouvelles pistes d'exploration dans l'imagerie de l'IC incluent l'évaluation de la rigidité myocardique, l'architecture des fibres myocardiques ou la cartographie de la microcirculation coronaire en échographie ultra-rapide, la surcharge en fer myocardique, l'imagerie 3D+t plus exhaustive des flux sanguins intracardiaques et artériels, la rigidité de la paroi aortique et pulmonaire, ainsi que le tissu adipeux épicaudique et enfin la spectroscopie moléculaire et métabolique par IRM. L'ensemble de ces techniques émergentes et prometteuses pourraient permettre d'améliorer la compréhension des mécanismes en jeu dans l'IC, y compris aux stades infra-cliniques.

Summary

Heart failure (HF) evaluation is based on several exams including non-invasive imaging tests, which play a major role. Echocardiography is cardiac imaging clinical reference while Magnetic Resonance Imaging (MRI), due to its low availability, higher cost and complexity, is the second-line modality in HF. Diagnostic and prognostic value of many quantitative measures provided by echocardiography and MRI has been demonstrated in HF, both in the left and right heart sides: indices related to chamber geometry, volumetry, ventricular filling velocities and systolic function including reference ejection fraction (EF), which is currently used to stratify HF severity degree. Among these, myocardial strain is gaining more and more interest, since it is often already altered in HF with preserved EF and is thus thought to be more robust than conventional EF in detecting subtle alterations. Although 3D echocardiography has now improved precision of volumetric measurements compared to standard 2D techniques, MRI thanks to its excellent spatial resolution and anatomical coverage, has become gold standard for the evaluation of left ventricular (LV) volumes and hence LV EF, LV mass as well as right ventricular volumes and function. MRI can further uniquely provide insights into myocardial structural changes such as evaluation of focal replacement fibrosis (late enhancement after injection of a gadolinium-based contrast agent), diffuse interstitial fibrosis and extracellular volume (pre- and post-injection T1 mapping) and contrast-enhanced first-pass perfusion. Finally, cardiac CT is used to evaluate coronary artery calcium score and presence of stenoses, after injection of a contrast agent in order to rule out concomitant ischemic cardiopathy, as well as cardiac volumes, myocardial hypoperfusion lesions, replacement and interstitial fibrosis. Recent exploration advances in HF imaging include evaluation of myocardial stiffness, fiber architecture or coronary microcirculation using ultrafast echography, MRI-derived myocardial iron loading, comprehensive 3D+t intracardiac and arterial blood flow, aortic and pulmonary wall stiffness, epicardial adipose tissue as well as molecular and metabolic spectroscopy. Such emerging and promising techniques might altogether help better understand mechanisms underlying HF, preferably at the earliest stages.

Mots clés : insuffisance cardiaque, IRM, échocardiographie, scanner, imagerie avancée

Key words: heart failure, MRI, echocardiography, CT, advanced imaging

Les auteurs déclarent ne pas avoir de conflits d'intérêt avec le contenu de cet article.

Points essentiels

- L'imagerie non-invasive de l'insuffisance cardiaque (IC) inclut l'échocardiographie, l'IRM et le scanner
- L'imagerie est prépondérante pour les patients atteints d'IC tant elle intervient aux stades diagnostique et pronostique
- Les mesures conventionnelles quantifient la géométrie, volumétrie, fonction systolique dont la fraction d'éjection est référence et permet de stratifier le degré d'atteinte de l'IC, vitesses de remplissage ventriculaires, vitesses de déformation myocardique et composition tissulaire (perfusion, fibrose) à la fois dans le cœur gauche et le cœur droit
- Des mesures plus avancées sur la rigidité myocardique, l'orientation des fibres myocardiques, la cartographie de la microcirculation coronaire, la surcharge en fer myocardique, l'imagerie 3D+t plus exhaustive des flux sanguins intracardiaques et artériels, la rigidité de la paroi artérielle, le tissu adipeux épicardique et enfin la spectroscopie moléculaire et métabolique du myocarde, font aujourd'hui l'objet de recherches pour évaluer leur utilité clinique dans l'IC

Introduction

L'insuffisance cardiaque (IC) touche environ 1 à 2 % de la population mondiale (1) et 2,3 % de la population française, allant jusqu'à 10 % chez les plus de 70 ans, selon un rapport de santé publique France. Le taux de mortalité pour les patients diagnostiqués avec une IC est d'environ 30 % à 1 an et 45 à 65 % à 5 ans post-diagnostic (2). Ces statistiques classent ainsi l'IC comme une épidémie mondiale aux conséquences graves. L'IC est un syndrome clinique causé par diverses étiologies, induisant une perte des fonctions systolique et/ou diastolique accompagnée d'une congestion pulmonaire (3). Les recommandations récentes (3) classifient l'IC selon la fraction d'éjection (FE) du ventricule gauche (VG) du patient en trois catégories : IC avec une FEVG réduite ($FEVG < 40\%$) ; IC avec une FEVG modérément réduite ($FEVG$ entre 40 % et 50 %) ; et IC avec une FEVG préservée ($FEVG \geq 50\%$). L'évaluation de l'IC est complexe et requiert un faisceau d'arguments incluant les tests biologiques de laboratoire, l'électrophysiologie, divers tests d'imagerie, des tests d'effort, des évaluations hémodynamiques invasives ou encore la biopsie endo-myocardique.

L'imagerie cardiovasculaire est une pierre angulaire pour l'évaluation des patients souffrant d'IC. Grâce à son caractère non-invasif, l'estimation de la volumétrie et de la fonction cardiaque par imagerie constitue un outil clinique crucial pour l'exploration de l'IC. L'imagerie cardiaque ne cesse d'évoluer, offrant aujourd'hui une caractérisation fonctionnelle, hémodynamique et tissulaire détaillée du cœur. La présente revue offre un aperçu général des stratégies d'imagerie disponibles pour les patients atteints d'IC allant des stratégies ancrées dans la routine clinique à celles émergeant dans les évolutions récentes en recherche.

Echocardiographie dans l'IC

L'échocardiographie, examen d'imagerie cardiaque de première intention, joue un rôle majeur dans l'IC, procurant de précieuses informations à visée diagnostique et pronostique. Dans le cadre d'une suspicion d'IC, l'échocardiographie inclura en première ligne les mesures VG communément utilisées en pratique clinique, à savoir : la FEVG, la volumétrie et l'hypertrophie VG, la volumétrie de l'oreillette gauche (OG) et le ratio de remplissage VG E/e'. Les mesures de volumétrie en échocardiographie 2D sont le plus souvent réalisées avec la méthode Simpson biplan. Dans le cas d'une mauvaise qualité d'images, le praticien peut avoir recours à un agent de contraste afin d'opacifier la cavité VG. Enfin on notera que l'échographie 3D a permis de significativement améliorer la précision des mesures de volumétrie VG, comme l'attestent les comparaisons à la référence standard qui est l'IRM (4). L'utilisation

de cette technologie 3D a permis également d'aider à l'interprétation ainsi qu'à la quantification des maladies valvulaires telles que la régurgitation mitrale (4), que l'on retrouve communément chez les patients atteints d'IC.

Par ailleurs, le suivi de speckle en échocardiographie est de plus en plus utilisé afin d'extraire des informations sur la déformation myocardique, notamment la déformation longitudinale (« strain » longitudinal) du myocarde VG mesurée au pic systolique qui est reconnue comme un paramètre plus robuste que la FEVG pour déceler des altérations subtiles de la contraction myocardique. Dans l'IC, le strain longitudinal du VG corrèle avec l'augmentation des peptides natriurétiques pouvant ainsi faciliter l'identification des patients souffrant d'une IC à FEVG préservée (5). Il n'est pas surprenant que l'altération du strain longitudinal précède celle de la FEVG, tant cette dernière dépend principalement de la composante circumférentielle de la contraction VG, qui ne semble pas être affectée dans l'IC (6), notamment l'IC à FEVG préservée.

Un autre indicateur échocardiographique majeur dans l'IC réside dans l'évaluation non-invasive, par échocardiographie Doppler, de la fonction diastolique au travers de la mesure du flux transmitral (ondes E et A du remplissage VG) et de la vitesse de déplacement longitudinal de l'anneau mitral (e'). Une augmentation du ratio E/e' accompagnée d'une baisse de la vitesse tissulaire e' est indicatrice de l'élévation des pressions de remplissage VG. Ces mesures VG peuvent être complétées par des mesures OG. En effet, l'OG est une cavité à paroi fine ayant un rôle de réservoir, de conduit et de pompe du sang oxygéné. De par sa paroi fine, elle est cible de dilatation lorsque les pressions de remplissage sont augmentées. Il a été montré qu'une dilatation de l'OG était associée à une augmentation des peptides natriurétiques ainsi qu'à un risque augmenté d'événements cardiovasculaires dans l'IC et en population générale (7).

La fonction ventriculaire droite (VD), le niveau des pressions dans les veines caves et les artères pulmonaires peuvent aussi être évalués par échocardiographie, et ceci ne doit pas être négligé dans l'IC tant ces anomalies seraient associées à un mauvais pronostic (8). En effet, des pressions de remplissage VG élevées et non contrôlées conduisent fatalement à une dysfonction VD, au développement d'une hypertension pulmonaire et à un mauvais pronostic. En pratique, la pression systolique dans l'artère pulmonaire (AP) peut être estimée via la mesure du pic de vitesse du jet tricuspide régurgitant en Doppler. L'élévation de cette pression peut aider à identifier les patients IC à risque. Sa mesure doit cependant être interprétée avec précaution notamment en présence d'une

régurgitation tricuspide ou d'une dysfonction VD sévères. Le diamètre de la veine cave inférieure et sa modification lors d'une manœuvre respiratoire peuvent aussi être estimés de manière fiable dans la majorité des patients avec IC afin d'évaluer l'état hydrique et les pressions de l'oreillette droite (OD). L'augmentation de ce diamètre est associée à une OD dilatée, à un taux de peptides natriurétiques plus élevé ainsi qu'à un risque accru d'événements cardiovasculaires prématurés, et ce quelle que soit la valeur de la FEVG. Inversement un diamètre qui s'effondre de plus de 50 % à l'inspiration chez les patients souffrant d'une IC chronique serait associé à un meilleur pronostic (9). Des évaluations successives du diamètre de la veine cave inférieure pourraient être utilisées pour surveiller la réponse aux diurétiques, chez les patients hospitalisés pour une IC. Lorsque la veine cave inférieure est inaccessible, une sonde échographique haute fréquence peut être utilisée pour réaliser des mesures au niveau de la veine jugulaire interne, dont la variation du diamètre ou de l'aire transversale entre repos et manœuvre de Valsalva est corrélée au taux de peptides natriurétiques ainsi qu'à la fonction VD (10). Enfin, l'échographie pourrait également être un test rapide pour déceler la congestion pulmonaire par des mesures directes dans le parenchyme (11).

Imagerie par résonance magnétique (IRM) dans l'IC

L'IRM se positionne en seconde ligne dans l'IC comparée à l'échocardiographie car elle reste moins disponible, moins économique et les examens sont plus complexes et/ou de moins bonne qualité chez les patients avec une IC ne pouvant pas toujours tenir une apnée, souvent en fibrillation auriculaire, porteurs d'un défibrillateur ou d'un pacemaker (aujourd'hui compatibles). Malgré ce constat, les points forts de l'IRM incluent ses excellentes résolution spatiale et couverture anatomique, ainsi que son unique capacité à quantifier les volumes cardiaques et les modifications structurelles du myocarde avec une excellente précision. L'IRM est ainsi devenue une méthode fondamentale très complémentaire de l'échocardiographie pour apporter des précisions sur l'étiologie de l'IC et des indices pronostiques selon les cardiomyopathies sous-jacentes en cause.

L'IRM est la méthode de référence pour la quantification des volumes VG et donc de la FEVG, ainsi que de la masse VG. En effet, ces mesures en IRM sont réalisées sur des coupes petit-axe (perpendiculaires au grand axe du VG) couvrant le VG de sa base à son apex et ne dépendent donc pas d'hypothèses géométriques comme en échocardiographie. Dans l'IC, le remodelage cardiaque et l'hypertrophie ventriculaire sont associés à une contraction myocardique et/ou une fonction diastolique altérées.

Bien que l'évaluation de la fonction diastolique, d'importance majeure dans l'IC, ne soit pas le domaine de prédilection de l'IRM, elle demeure possible grâce aux séquences de vélocimétrie IRM. Celles-ci consistent à positionner une coupe petit-axe parallèle au plan de l'anneau mitral, au niveau de l'extrémité des feuillets de la valve lorsque celle-ci est ouverte, avec un encodage de la vitesse (Venc) à travers cette coupe Venc ~ 150-200 cm/s pour mesurer le flux sanguin et Venc ~ 15-20 cm/s pour mesurer le déplacement longitudinal du myocarde. De ces images de vélocimétrie IRM, on peut mesurer les variations de vitesse ou de débit au cours du temps et en extraire les pics de l'onde E lors du remplissage précoce du VG et de l'onde A lors de la contraction atriale, les vitesses myocardiques correspondantes e' et a', le temps de décélération de l'onde E ou encore le temps de relaxation isovolumique (12). Les vitesses du flux veineux pulmonaire telles que les ondes S systolique et D diastolique peuvent aussi être évaluées avec cette technique (13). La faisabilité de l'IRM vélocimétrique 2D pour évaluer la fonction diastolique du VG a été démontrée chez des volontaires sains et des patients avec une dysfonction diastolique, en accord avec l'échocardiographie transthoracique (12,13).

L'IRM de vélocimétrie peut également explorer la vitesse moyenne dans le tronc de l'AP. Cette vitesse moyenne qui reflète le débit cardiaque permet d'identifier les patients à plus haut risque de développer des complications cardiovasculaires quand elle est diminuée (réadmission pour IC et mortalité toutes causes) dans l'IC à FEVG modérément réduite (14) et préservée.

Comme en échocardiographie, la déformation myocardique peut également être estimée en IRM soit par la technique de « tagging » (marquage tissulaire) qui est plus spécifique au VG et sa paroi plus épaisse, soit par la technique de suivi de texture qui est multi-chambre tant elle est robuste aux cavités à paroi fine et à géométrie complexe (15). L'IRM étant une imagerie en coupe couvrant le cœur selon différentes incidences, elle permet une estimation robuste du strain myocardique longitudinal, circonférentiel et radial. L'imagerie par tagging a été utilisée dans l'étude nord-américaine MESA, indiquant que la fonction diastolique VG estimée à partir des courbes de strain myocardique circonférentiel prédisait indépendamment la survenue d'une IC ou d'une fibrillation atriale au cours de la période de suivi de 8 ans (16). De plus, le strain longitudinal VG, mesuré par suivi de texture s'est avéré être un puissant prédicteur indépendant de la mortalité toutes causes dans une étude multicentrique portant sur 1 012 patients atteints d'une IC à FEVG réduite et suivis sur environ 4 ans (17).

Comme évoqué dans le paragraphe dédié à l'imagerie échocardiographique de l'IC, la taille de l'OG est un excellent indicateur de l'élévation des pressions de remplissage chez les patients IC à FEVG préservée. Dans une étude multicentrique sur 11 000 individus avec un suivi sur 4 ans, l'augmentation du volume OG mesuré en IRM et indexé à la surface corporelle, était indépendamment associée à la mortalité toutes causes (18). Au-delà du volume, la méthode de suivi de texture, appliquée aux images ciné IRM permet également d'évaluer la déformation myocardique de l'OG selon ses phases réservoir, conduit et contraction (Figure 1). Il a été montré qu'une augmentation des volumes OG, une réduction de la FE OG ainsi que du strain réservoir et contraction de l'OG sont associées avec une dysfonction diastolique. Une étude évaluant le strain atrial en IRM (19) a comparé des patients atteints d'IC à FEVG préservée (n = 101) à des patients à FEVG réduite (n = 120) et des patients sans IC (n = 640), démontrant que la déformation OG aux phases conduit et réservoir mesurée par suivi de texture prédisait indépendamment le risque d'admission pour une IC ou de mortalité.

L'IRM est également la méthode de référence pour les volumes et la fonction du VD. Dans une étude prospective observationnelle, la prévalence de la dysfonction du VD, mesurée à l'IRM, était de 19 % chez des patients IC à FEVG préservée (20). De plus, cette dysfonction du VD était indépendamment associée à la mortalité ainsi à l'hospitalisation pour IC.

Dans l'IC à FEVG préservée, la modification de la matrice extra-cellulaire avec une augmentation du taux de dépôt de collagène serait liée à l'inflammation et au stress oxydatif. Ce processus induit une fibrose myocardique qui contribuerait à l'altération de la relaxation VG dans l'IC à FEVG préservée. L'IRM a une capacité unique à caractériser à la fois la fibrose focale de remplacement au travers de la séquence de rehaussement tardif (RT) acquise après injection d'un produit de contraste gadoliné (Figure 2), ainsi que la fibrose diffuse interstitielle au travers des cartographies T1 (relaxation longitudinale) acquises pré- et post-injection, permettant d'estimer le volume extra-cellulaire (VEC). La présence de RT sur les images IRM de patients à risque d'IC incluant les patients diabétiques (21) semble augmenter le risque de mortalité. De plus, il a été montré qu'une bonne identification du RT peut considérablement améliorer la stratification du risque d'hospitalisation pour IC, indépendamment de l'état de la fonction systolique (22). Concernant la fibrose interstitielle mesurée par cartographie T1 et estimation du VEC en IRM, elle semble associée à la dysfonction diastolique ainsi qu'à la rigidité du myocarde VG chez les patients IC à FEVG préservée, mais pas chez les patients à FEVG réduite ni

chez les contrôles (23). Dans une cohorte de 410 patients à risque ou diagnostiqués avec une IC à FEVG préservée, le VEC myocardique était corrélé au taux de peptides natriurétiques et aux événements relatifs à l'IC incluant hospitalisation pour IC et mortalité (24).

Une autre mesure IRM des caractéristiques tissulaires peut se faire au travers de la perfusion myocardique réalisée au premier passage du produit de contraste. Löffler et coll. ont rapporté une dysfonction coronarienne significative chez les patients atteints d'IC à FEVG préservée, comme le révèle la réserve de perfusion myocardique mesurée par IRM de perfusion sous stress (25). L'IRM de perfusion sous stress est capable d'identifier les patients présentant un risque plus élevé d'événements cardiovasculaires majeurs dans le cadre de l'IC à FEVG préservée, sans maladie coronarienne connue. Enfin, l'IRM est aussi devenue une méthode essentielle dans le diagnostic de l'amylose cardiaque, qui donne très souvent de l'IC à FEVG préservée. Le T1 natif et le volume extracellulaire myocardique sont dans cette condition très augmentés dans les deux formes essentielles TTR ou AL, et souvent de façon précoce avant même l'apparition d'une hypertrophie VG (26). Le pronostic de l'amylose est aussi fonction de ces indices, de façon indépendante de l'hypertrophie et/ou d'une dysfonction diastolique présente ou non à l'échocardiographie (26).

Scanner cardiaque dans l'IC

En première ligne du scanner cardiaque on retrouve l'évaluation du score calcique coronaire, qui a été dans un premier temps utilisé pour exclure la présence d'une cardiopathie ischémique. Des études en population ont montré une excellente sensibilité (99 %, avec une spécificité de 92 %) de cette technique à diagnostiquer une atteinte de type ischémique chez des patients ayant une FEVG réduite (27). L'analyse du calcium coronaire s'est ainsi avérée être un outil de dépistage puissant, et pourrait continuer à jouer un rôle majeur chez les patients présentant une IC à risque faible à intermédiaire, bien que d'autres options d'imagerie puissent paraître plus appropriées chez ces patients. En plus de ce score calcique, l'injection d'un produit de contraste permet de bien quantifier non seulement l'ensemble de la charge athéromateuse sur tout le réseau coronaire et les sténoses éventuelles, mais également les volumes des cavités et du myocarde avec ses lésions d'hypoperfusion ou de fibrose quand elles sont présentes. Cette modalité peut être utilisée pour évaluer les volumes cardiaques de manière précise lorsque l'échocardiographie est non contributive et que l'IRM est contraindiquée, notamment chez des patients appareillés. Le développement des appareils à double énergie ou photoniques a permis de renforcer le rôle du scanner dans l'exploration du myocarde avec notamment l'évaluation du RT

(fibrose de remplacement) et du VEC (fibrose interstitielle), tant le rapport contraste/bruit est amélioré grâce à l'imagerie monochromatique et les cartes d'iode (28). Au-delà de ses fonctionnalités de diagnostic, le scanner peut être également utilisé afin de planifier les thérapies interventionnelles telles que : le remplacement valvulaire, la fermeture de l'auricule, la planification de la procédure d'ablation dans la fibrillation atriale.

Nouvelles pistes d'exploration dans l'imagerie de l'IC

Rigidité myocardique

Il est important de mentionner ici les avancées récentes de l'échographie ultra-rapide qui visent notamment à comprendre les propriétés viscoélastiques du myocarde, particulièrement intéressantes dans l'IC. Les propriétés mécaniques, telles que la rigidité des tissus et leur anisotropie, sont désormais accessibles par ultrasons grâce à l'imagerie à haute fréquence, c'est-à-dire ultra-rapide, par la détection des ondes mécaniques produites naturellement (dans le myocarde par la fermeture du clapet valvulaire et la contraction atriale (29) ou générées artificiellement par la transmission d'une onde mécanique externe avec une force de rayonnement acoustique (30). L'utilisation de cette force externe a permis d'estimer la rigidité myocardique à plusieurs instants du cycle cardiaque, fournissant une mesure non-invasive des courbes de pression-volume globales. Un autre facteur-clé dans la détection de l'IC pourrait être l'évaluation de l'orientation des fibres myocardiques. Avec le développement de l'imagerie ultrasonore à haute cadence 3D, plusieurs méthodes ont été proposées à cet effet : l'imagerie tensorielle rétrodiffusée, par ondes de cisaillement, ou par la détection des ondes mécaniques naturelles. Un exemple de propagation de la trajectoire de l'onde induite par la contraction atriale dans le myocarde VG est représenté dans la figure 3. Enfin, l'angiographie Doppler coronarienne ultrarapide a montré son potentiel pour cartographier le réseau coronarien avec une sensibilité élevée (31) et la microscopie de localisation par ultrasons ultrarapides 3D a permis de fournir des informations pertinentes sur l'anatomie et la fonction des artères coronaires sur un modèle de cœur de rat perfusé isolé. L'utilité de ces techniques modernes dans l'IC reste néanmoins à étudier.

Surcharge en fer myocardique

L'IC associée à une surcharge en fer est la cause de décès la plus courante chez les patients atteints de thalassémie majeure. La ferritine sérique ne fournit malheureusement pas une indication fiable du fer cardiaque, et les techniques d'imagerie conventionnelles pour surveiller la FEVG sont limitées par l'apparition tardive de la dysfonction ventriculaire, qui ne devient visible qu'après un dépôt de fer conséquent. L'évaluation du fer par les séquences d'IRM pondérées en T2* repose sur la mesure de la relaxation T2* à partir de séquences « écho de gradient ». D'après une étude menée sur 652 patients atteints de thalassémie, le T2* était inférieur à 10 ms chez 98 % des patients ayant développé une IC, avec une probabilité de dysfonction VG augmentant progressivement à mesure que les valeurs du T2* diminuaient : 14 % pour des valeurs comprises entre 8 et 10 ms, 30 % entre 6 et 8 ms, et 47 % pour des valeurs inférieures à 6 ms (32).

Tissu adipeux épicardique (TAE)

L'accumulation de la graisse épicardique (Figure 4) a été systématiquement associée à l'hypertrophie ventriculaire gauche, à la dysfonction diastolique et à la dilatation des oreillettes, considérées comme des signes caractéristiques de l'IC à FEVG préservée. De plus, l'augmentation de TAE a été liée à une augmentation des pressions de remplissage cardiaque et à une intolérance à l'exercice chez les patients atteints d'IC à FEVG préservée (33). Il convient cependant de noter qu'il reste encore à déterminer si le TAE contribue activement à l'IC à FEVG préservée ou s'il en est un simple observateur passif. En effet, plusieurs études ont souligné que les comorbidités qui affectent la fonction cardiaque dans l'IC à FEVG préservée, à savoir la maladie coronarienne, l'obésité, l'hypertension et le diabète de type 2, sont également associées à une augmentation du TAE.

Imagerie 3D+t des flux intracardiaques et artériels

Une nouvelle séquence IRM de vélocimétrie 4D (volume 3D avec un encodage des vitesses dans les trois directions de l'espace et dans le temps, Figure 5) a récemment émergé pour l'évaluation de la fonction diastolique du VG (34), bien que sa supériorité à la séquence 2D reste à prouver. En revanche, l'IRM de flux 4D offre une évaluation hémodynamique au-delà des indices conventionnels de vitesse ou de débit, incluant les vortex (tourbillons), les gradients de pression ou l'énergie cinétique, le tout avec une couverture 3D. Une étude d'IRM de flux 4D chez des patients avec diverses maladies cardiaques a décrit la présence de vortex intra-VG aux phases de remplissage précoce et tardif aux niveaux basal et mid-VG chez les patients avec une FEVG préservée, favorisant potentiellement l'acheminement du sang vers la chambre de chasse. Chez les patients à FEVG réduite ces vortex étaient plus larges, plus

sphériques et déplacés vers l'apex pouvant résider dans le VG pendant l'intégralité du cycle cardiaque. L'énergie cinétique, proportionnelle au carré de la vitesse fournie par l'IRM de flux 4D, refléterait la quantité de travail fournie par le myocarde pour accélérer le flux sanguin. Alors que cette énergie en systole était similaire entre des volontaires sains (contrôles), des patients avec une dysfonction diastolique infraclinique, et des patients avec une IC à FEVG préservée, modérément réduite ou réduite, l'énergie diastolique était significativement élevée chez les patients IC par rapport aux contrôles, mais similaire entre les différents groupes de patients (35).

Les pressions artérielles pulmonaires, traditionnellement accessibles par cathétérisme, sont déterminantes pour les patients IC en particulier ceux à FEVG préservée. Un écoulement sanguin non-laminaire complexe accompagné du développement de vortex a été observé le long du tronc pulmonaire de patients atteints d'hypertension artérielle pulmonaire (HTAP), à partir de l'IRM de flux 4D (36), et la précocité d'apparition de ces vortex ainsi que leur durée exprimée en % du cycle cardiaque ont permis de proposer une estimation des pressions pulmonaires (PAP) : les vortex de durée ≥ 15 % du cycle cardiaque correspondaient à une PAP moyenne au-delà de 25 mmHg mesurée par cathétérisme (36). Enfin, malgré l'utilité potentielle de l'IRM de flux 4D, des études systématiques longitudinales dans le contexte spécifique de l'IC sont requises. Ces résultats sont par ailleurs à mitiger par le fait que cette séquence est longue en termes d'acquisition et d'analyse.

Evaluation de l'aorte et de l'artère pulmonaire

L'élévation de la post-charge artérielle peut être à l'origine de la dysfonction systolique ventriculaire. Ainsi dans cette section, nous nous intéressons à l'étude de la dilatation et de la rigidité de la paroi aortique, à gauche, et de l'artère pulmonaire à droite. La rigidité artérielle peut être caractérisée par 3 indices mesurables non-invasivement en IRM : 1- la déformation typiquement mesurée comme $(A_{max} - A_{min}) / A_{min}$ où A_{max} et A_{min} sont les surfaces transverses maximale et minimale du calibre artériel, respectivement ; 2- la distensibilité = déformation / PP où PP est la pression pulsée = pressions systolique – diastolique ; 3- la vitesse de propagation de l'onde de pouls (VOP) = $D/\Delta t$ où Δt est le délai temporel entre les courbes de vitesse ou débit mesurées par vélocimétrie sur 2 sites artériels séparés par une longueur D. Une rigidité artérielle prononcée induit un effondrement de la déformation et de la distensibilité, ainsi qu'une élévation de la VOP.

Globalement moins de travaux se sont penchés sur ces indices. Tout d'abord, un rapport entre le diamètre de l'artère pulmonaire/diamètre aortique supérieur à 0,83, facilement mesurable en IRM ciné standard, était associé à un mauvais pronostic chez les patients avec une IC à FEVG préservée (37). La rigidité de l'AP a également été démontrée, à la fois en termes de déformation et de VOP, chez des patients en IC quelle que soit leur FEVG par rapport à des contrôles (38). Quant à la rigidité aortique, plusieurs observations sont décrites dans la littérature : la VOP aortique était notamment augmentée chez des patients avec une IC à FEVG préservée par rapport à des contrôles, et elle était significativement associée à une élévation de la pression artérielle pulmonaire d'occlusion et du taux de peptides natriurétiques.

Spectroscopie par résonance magnétique nucléaire

La spectroscopie par résonance magnétique nucléaire (SRM) offre une fenêtre sur la fonction cardiaque au niveau moléculaire et métabolique. Le ratio PCr/ATP de phosphocréatine / adénosine triphosphate (ATP) estimé par spectroscopie du phosphore 31 (^{31}P), en tant que marqueur indirect des réserves énergétiques cellulaires disponibles, peut être modifié à différents stades d'IC, ce qui donne lieu à l'hypothèse d'une carence énergétique dans l'IC. Une étude récente menée par Samuel et coll. a montré que la diminution de l'ATP détectée par SRM avant l'implantation d'un défibrillateur pour prévention primaire était prédictive d'événements arythmiques et de décès cardiaque chez les patients atteints d'une IC à FEVG réduite suivis sur 10 ans (39). Le ratio PCr/ATP au repos ainsi que l'augmentation du débit cardiaque induite par l'exercice étaient diminués (40) chez les patients atteints d'une IC à FEVG préservée comparés aux témoins.

Références

1. Groenewegen A, Rutten FH, Mosterd A, Hoes AW. Epidemiology of heart failure. Eur J Heart Fail. août 2020;22(8):1342-56.
2. Bytyçi I, Bajraktari G. Mortality in heart failure patients. Anadolu Kardiyol Derg Anatol J Cardiol. 22 janv 2015;15(1):63-8.
3. Maddox TM, Januzzi JL, Allen LA, Breathett K, Butler J, Davis LL, et al. 2021 Update to the 2017 ACC Expert Consensus Decision Pathway for Optimization of Heart Failure Treatment: Answers to 10 Pivotal Issues About Heart Failure With Reduced Ejection Fraction. J Am Coll Cardiol. févr 2021;77(6):772-810.
4. Poon J, Leung JT, Leung DY. 3D Echo in Routine Clinical Practice – State of the Art in 2019. Heart Lung Circ. sept 2019;28(9):1400-10.

5. Pellicori P, Kallvikbacka-Bennett A, Khaleva O, Carubelli V, Costanzo P, Castiello T, et al. Global longitudinal strain in patients with suspected heart failure and a normal ejection fraction: does it improve diagnosis and risk stratification? *Int J Cardiovasc Imaging.* janv 2014;30(1):69-79.
6. Stokke TM, Hasselberg NE, Smedsrud MK, Sarvari SI, Haugaa KH, Smiseth OA, et al. Geometry as a Confounder When Assessing Ventricular Systolic Function. *J Am Coll Cardiol.* août 2017;70(8):942-54.
7. Gupta S, Matulevicius SA, Ayers CR, Berry JD, Patel PC, Markham DW, et al. Left atrial structure and function and clinical outcomes in the general population. *Eur Heart J.* 21 janv 2013;34(4):278-85.
8. Gorter TM, Van Veldhuisen DJ, Bauersachs J, Borlaug BA, Celutkiene J, Coats AJS, et al. Right heart dysfunction and failure in heart failure with preserved ejection fraction: mechanisms and management. Position statement on behalf of the Heart Failure Association of the European Society of Cardiology. *Eur J Heart Fail.* janv 2018;20(1):16-37.
9. Pellicori P, Carubelli V, Zhang J, Castiello T, Sherwi N, Clark AL, et al. IVC Diameter in Patients With Chronic Heart Failure. *JACC Cardiovasc Imaging.* janv 2013;6(1):16-28.
10. Simon MA, Schnatz RG, Romeo JD, Pacella JJ. Bedside Ultrasound Assessment of Jugular Venous Compliance as a Potential Point-of-Care Method to Predict Acute Decompensated Heart Failure 30-Day Readmission. *J Am Heart Assoc.* 7 août 2018;7(15):e008184.
11. Gargani L. Ultrasound of the Lungs. *Heart Fail Clin.* avr 2019;15(2):297-303.
12. Bollache E, Redheuil A, Clément-Guinaudeau S, Defrance C, Perdrix L, Ladouceur M, et al. Automated left ventricular diastolic function evaluation from phase-contrast cardiovascular magnetic resonance and comparison with Doppler echocardiography. *J Cardiovasc Magn Reson.* oct 2010;12(1):63.
13. Buss SJ, Krautz B, Schnackenburg B, Abdel-Aty H, Santos MFB, Andre F, et al. Classification of diastolic function with phase-contrast cardiac magnetic resonance imaging: validation with echocardiography and age-related reference values. *Clin Res Cardiol.* juin 2014;103(6):441-50.
14. Shi YN, Yuan F, Xu Y. Assessing the prognostic significance of mean pulmonary artery velocity in heart failure with slightly reduced ejection fraction. *Curr Probl Cardiol.* févr 2024;49(2):102238.
15. Lamy J, Soulat G, Evin M, Huber A, De Cesare A, Giron A, et al. Scan-rescan reproducibility of ventricular and atrial MRI feature tracking strain. *Comput Biol Med.* janv 2018;92:197-203.
16. Ambale-Venkatesh B, Armstrong AC, Liu CY, Donekal S, Yoneyama K, Wu CO, et al. Diastolic function assessed from tagged MRI predicts heart failure and atrial fibrillation over an 8-year follow-up period: the multi-ethnic study of atherosclerosis. *Eur Heart J - Cardiovasc Imaging.* 1 avr 2014;15(4):442-9.
17. Romano S, Judd RM, Kim RJ, Kim HW, Klem I, Heitner JF, et al. Feature-Tracking Global Longitudinal Strain Predicts Death in a Multicenter Population of Patients With Ischemic and Nonischemic Dilated Cardiomyopathy Incremental to Ejection Fraction and Late Gadolinium Enhancement. *JACC Cardiovasc Imaging.* oct 2018;11(10):1419-29.
18. Khan MA, Yang EY, Zhan Y, Judd RM, Chan W, Nabi F, et al. Association of left atrial volume index and all-cause mortality in patients referred for routine cardiovascular magnetic resonance: a multicenter study. *J Cardiovasc Magn Reson.* janv 2019;21(1):4.
19. Chirinos JA, Sardana M, Ansari B, Satija V, Kuriakose D, Edelstein I, et al. Left Atrial Phasic Function by Cardiac Magnetic Resonance Feature Tracking Is a Strong Predictor of Incident Cardiovascular Events. *Circ Cardiovasc Imaging.* déc 2018;11(12):e007512.

20. Kanagala P, Arnold JR, Singh A, Khan JN, Gulsin GS, Gupta P, et al. Prevalence of right ventricular dysfunction and prognostic significance in heart failure with preserved ejection fraction. *Int J Cardiovasc Imaging*. janv 2021;37(1):255-66.
21. Kwong RY, Sattar H, Wu H, Vorobiof G, Gandla V, Steel K, et al. Incidence and Prognostic Implication of Unrecognized Myocardial Scar Characterized by Cardiac Magnetic Resonance in Diabetic Patients Without Clinical Evidence of Myocardial Infarction. *Circulation*. 2 sept 2008;118(10):1011-20.
22. Wong TC, Piehler KM, Zareba KM, Lin K, Phrampus A, Patel A, et al. Myocardial Damage Detected by Late Gadolinium Enhancement Cardiovascular Magnetic Resonance Is Associated With Subsequent Hospitalization for Heart Failure. *J Am Heart Assoc*. 18 nov 2013;2(6):e000416.
23. Su MYM, Lin LY, Tseng YHE, Chang CC, Wu CK, Lin JL, et al. CMR-Verified Diffuse Myocardial Fibrosis Is Associated With Diastolic Dysfunction in HFpEF. *JACC Cardiovasc Imaging*. oct 2014;7(10):991-7.
24. Schelbert EB, Fridman Y, Wong TC, Abu Daya H, Piehler KM, Kadakkal A, et al. Temporal Relation Between Myocardial Fibrosis and Heart Failure With Preserved Ejection Fraction: Association With Baseline Disease Severity and Subsequent Outcome. *JAMA Cardiol*. 1 sept 2017;2(9):995.
25. Löffler AI, Pan JA, Balfour PC, Shaw PW, Yang Y, Nasir M, et al. Frequency of Coronary Microvascular Dysfunction and Diffuse Myocardial Fibrosis (Measured by Cardiovascular Magnetic Resonance) in Patients With Heart Failure and Preserved Left Ventricular Ejection Fraction. *Am J Cardiol*. nov 2019;124(10):1584-9.
26. Fontana M, Pica S, Reant P, Abdel-Gadir A, Treibel TA, Banypersad SM, et al. Prognostic Value of Late Gadolinium Enhancement Cardiovascular Magnetic Resonance in Cardiac Amyloidosis. *Circulation*. 20 oct 2015;132(16):1570-9.
27. Budoff MJ, Shavelle DM, Lamont DH, Kim HT, Akinwale P, Kennedy JM, et al. Usefulness of electron beam computed tomography scanning for distinguishing ischemic from nonischemic cardiomyopathy. *J Am Coll Cardiol*. nov 1998;32(5):1173-8.
28. Chang S, Han K, Youn JC, Im DJ, Kim JY, Suh YJ, et al. Utility of Dual-Energy CT-based Monochromatic Imaging in the Assessment of Myocardial Delayed Enhancement in Patients with Cardiomyopathy. *Radiology*. mai 2018;287(2):442-51.
29. Salles S, Espeland T, Molares A, Aase SA, Hammer TA, Støylen A, et al. 3D Myocardial Mechanical Wave Measurements. *JACC Cardiovasc Imaging*. août 2021;14(8):1495-505.
30. Pernot M, Lee WN, Bel A, Mateo P, Couade M, Tanter M, et al. Shear Wave Imaging of Passive Diastolic Myocardial Stiffness. *JACC Cardiovasc Imaging*. sept 2016;9(9):1023-30.
31. Maresca D, Correia M, Villemain O, Bizé A, Sambin L, Tanter M, et al. Noninvasive Imaging of the Coronary Vasculature Using Ultrafast Ultrasound. *JACC Cardiovasc Imaging*. juin 2018;11(6):798-808.
32. Kirk P, Roughton M, Porter JB, Walker JM, Tanner MA, Patel J, et al. Cardiac T2* Magnetic Resonance for Prediction of Cardiac Complications in Thalassemia Major. *Circulation*. 17 nov 2009;120(20):1961-8.
33. Gorter TM, Van Woerden G, Rienstra M, Dickinson MG, Hummel YM, Voors AA, et al. Epicardial Adipose Tissue and Invasive Hemodynamics in Heart Failure With Preserved Ejection Fraction. *JACC Heart Fail*. août 2020;8(8):667-76.
34. Alattar Y, Soulat G, Gencer U, Messas E, Bollache E, Kachenoura N, et al. Left ventricular diastolic early and late filling quantified from 4D flow magnetic resonance imaging. *Diagn Interv Imaging*. juill 2022;103(7-8):345-52.

35. Arvidsson PM, Nelsson A, Edlund J, Smith JG, Magnusson M, Jin N, et al. Kinetic energy of left ventricular blood flow across heart failure phenotypes and in subclinical diastolic dysfunction. *J Appl Physiol.* 1 sept 2022;133(3):697-709.
36. Reiter G, Reiter U, Kovacs G, Olschewski H, Fuchsjäger M. Blood Flow Vortices along the Main Pulmonary Artery Measured with MR Imaging for Diagnosis of Pulmonary Hypertension. *Radiology.* avr 2015;275(1):71-9.
37. Karakus G, Kammerlander AA, Aschauer S, Marzluf BA, Zotter-Tufaro C, Bachmann A, et al. Pulmonary artery to aorta ratio for the detection of pulmonary hypertension: cardiovascular magnetic resonance and invasive hemodynamics in heart failure with preserved ejection fraction. *J Cardiovasc Magn Reson.* janv 2015;17(1):79.
38. Hou X, Hashemi D, Erley J, Neye M, Bucius P, Tanacli R, et al. Noninvasive evaluation of pulmonary artery stiffness in heart failure patients via cardiovascular magnetic resonance. *Sci Rep.* 19 déc 2023;13(1):22656.
39. Samuel TJ, Lai S, Schär M, Wu KC, Steinberg AM, Wei AC, et al. Myocardial ATP depletion detected noninvasively predicts sudden cardiac death risk in patients with heart failure. *JCI Insight.* 22 juin 2022;7(12):e157557.
40. Phan TT, Abozguia K, Nallur Shivu G, Mahadevan G, Ahmed I, Williams L, et al. Heart Failure With Preserved Ejection Fraction Is Characterized by Dynamic Impairment of Active Relaxation and Contraction of the Left Ventricle on Exercise and Associated With Myocardial Energy Deficiency. *J Am Coll Cardiol.* juill 2009;54(5):402-9.

Figures

Figure 1. Exemples de variation de la déformation myocardique longitudinale dans l'oreillette gauche (OG) au cours du cycle cardiaque (droite) obtenue par suivi de texture appliqué à des images d'IRM ciné en vue long-axe 2-cavités (gauche) : a) chez un patient avec une OG dilatée présentant un effondrement significatif de la déformation myocardique et b) un volontaire sain avec une déformation normale.

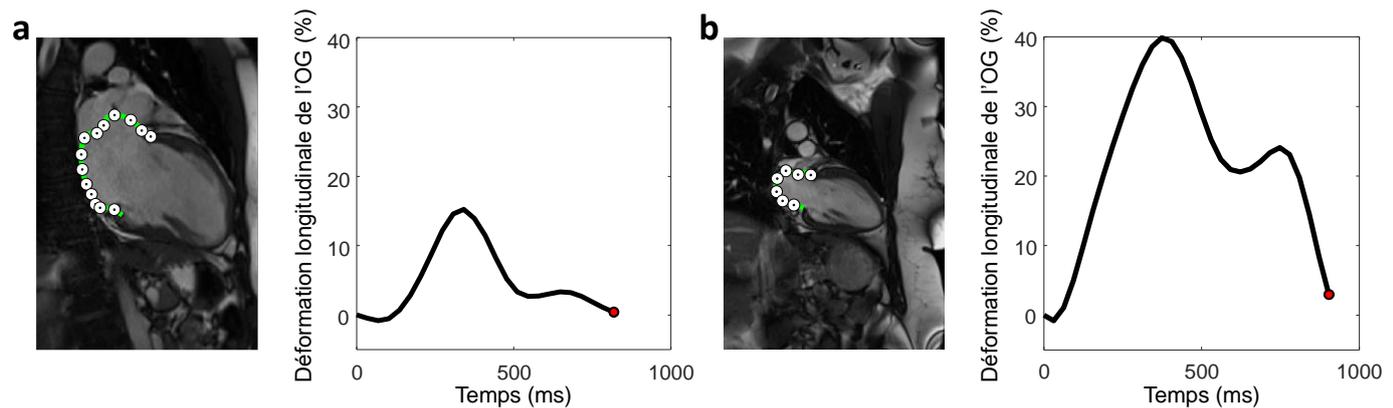


Figure 2. Image d'IRM de rehaussement tardif après injection d'un produit de contraste, indiquant la présence de fibrose de remplacement sur la paroi latérale du ventricule gauche au niveau basal (flèche) chez un patient atteint d'insuffisance cardiaque.

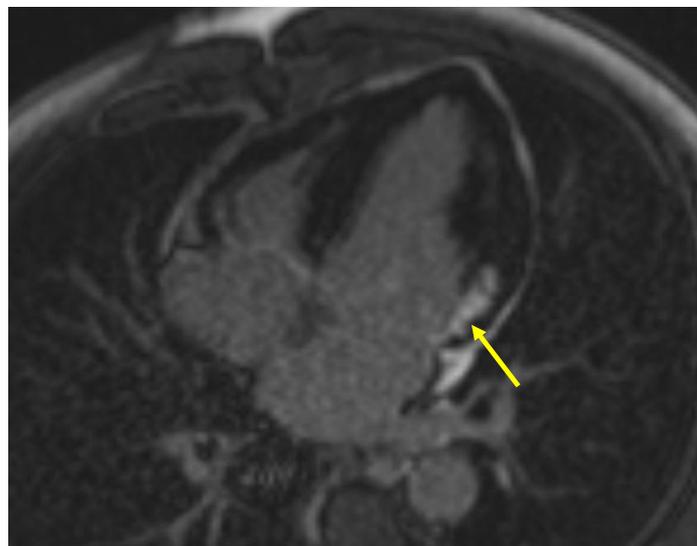


Figure 3. Résultats préliminaires de la reconstruction 3D de la trajectoire de l'onde générée par la contraction atriale obtenue *in vivo* chez l'humain par imagerie ultrasonore ultra-rapide (800 volumes par seconde). Imagettes successives à différents instants : imagerie de l'onde mécanique ; illustration centrale : lignes de courant reconstruites à partir du champ de vecteurs estimé avec le gradient spatial en 3D du temps de vol de l'onde (29). Remerciements aux Pr Lasse Lovstakken et Dr Torvald Espeland

(Norwegian University of Science and Technology) pour avoir fourni les données utilisées pour illustration.

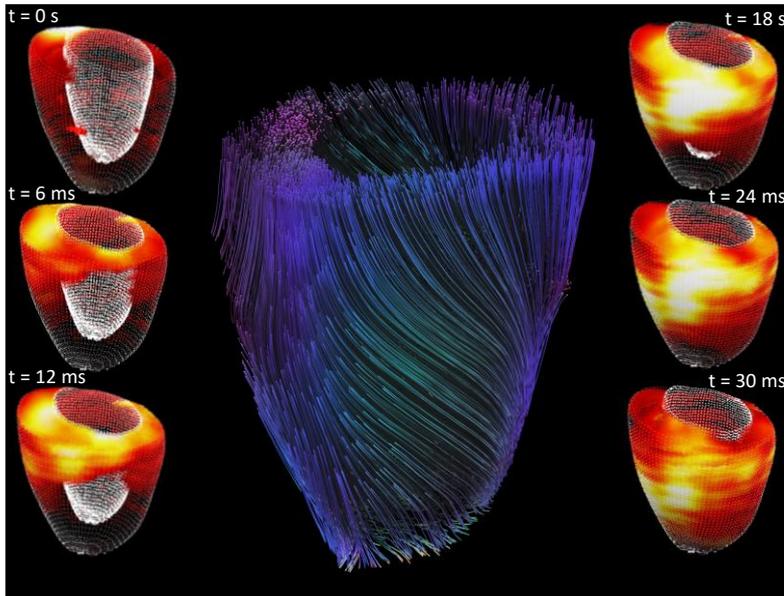


Figure 4. Illustration de l'estimation du tissu adipeux épicardique (TAE) en IRM en coupe petit-axe (zone située entre les contours vert et rouge) sur une phase systolique, chez deux patients avec une insuffisance cardiaque présentant des degrés de TAE différents.

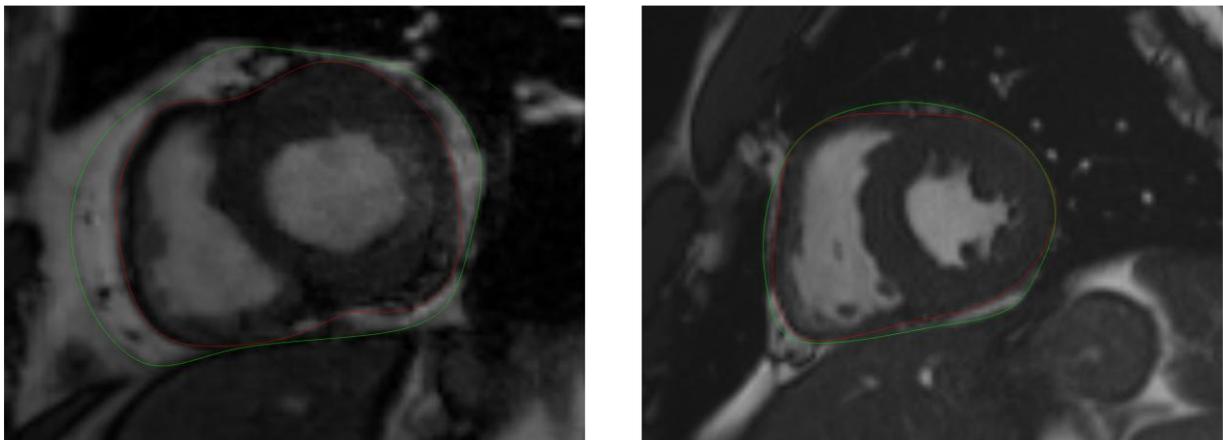


Figure 5. Exemples d'images volumétriques d'IRM de flux 4D illustrant l'écoulement sanguin dans les cavités cardiaques et les grosses artères lors de la phase d'éjection systolique (à gauche) et de conduit atrial (à droite).

