



HAL
open science

Imagerie par résonance magnétique cardiovasculaire et ses applications dans la cardiomyopathie diabétique

Nadjia Kachenoura, Khaoula Bouazizi-Verdier, Fabrizio Andreelli, Alban Redheuil

► **To cite this version:**

Nadjia Kachenoura, Khaoula Bouazizi-Verdier, Fabrizio Andreelli, Alban Redheuil. Imagerie par résonance magnétique cardiovasculaire et ses applications dans la cardiomyopathie diabétique. *Médecine des Maladies Métaboliques*, 2021, 15 (3), pp.260-266. 10.1016/j.mmm.2021.02.001 . hal-03942228

HAL Id: hal-03942228

<https://hal.science/hal-03942228>

Submitted on 9 May 2023

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.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial 4.0 International License

Rubrique

Mise au point / Dossier

Thématique

Dossier thématique « Insuffisance cardiaque et diabète »

Imagerie par résonance magnétique cardiovasculaire et ses applications dans la cardiomyopathie diabétique

Cardiac MRI and its application in diabetic cardiomyopathy

Nadjia Kachenoura^{1,2}, Khaoula Bouazizi-Verdier^{1,2}, Fabrizio Andreelli^{2,3,4}, Alban Redheuil^{1,2,5}

¹ Sorbonne Université, CNRS, INSERM, Laboratoire d'imagerie biomédicale (LIB), Paris, France.

² Hôpital Pitié-Salpêtrière, Institut de Cardiométabolisme et nutrition (ICAN), Paris, France.

³ Assistance Publique-Hôpitaux de Paris (AP-HP), CHU Pitié-Salpêtrière, Service de diabétologie-métabolismes, Paris, France.

⁴ Sorbonne Université, INSERM UMR 1269, Nutriomics, Paris, France.

⁵ Assistance Publique-Hôpitaux de Paris (APHP), CHU Pitié Salpêtrière, Unité d'imagerie cardiothoracique, Paris, France.

Correspondance

Nadjia Kachenoura

Sorbonne Université UM CR2, CNRS UMR 7371 - INSERM U1146, Laboratoire d'Imagerie Biomédicale, Équipe d'Imagerie Cardiovasculaire, Campus des Cordeliers, 15, rue de l'École de Médecine, 75006 Paris, France.

nadjia.kachenoura@inserm.fr

Résumé

L'imagerie par résonance magnétique (IRM) cardiovasculaire permet, grâce à ses incessantes innovations technologiques, de réaliser une imagerie *in vivo* d'un cœur battant et d'une artère pulsatile avec une couverture anatomique et un contraste inégalables. Cette exploration peut être réalisée à l'état de repos, mais également sous stress pharmacologique afin de détecter une maladie coronaire, souvent infraclinique, chez les patients diabétiques. Combinée à des méthodes de traitement d'images avancées, elle permet également une analyse quantitative et multiparamétrique du système cardiocirculatoire, en donnant accès à une mesure précise de sa géométrie et de sa fonction, ainsi qu'à ses caractéristiques tissulaires et métaboliques. L'altération de ces biomarqueurs d'IRM dans la cardiomyopathie diabétique à un stade très précoce, avant même l'apparition des symptômes, en fait un examen déterminant dans l'exploration de ces patients. En effet, la capacité de l'IRM à explorer finement l'altération fonctionnelle du cœur et des vaisseaux associant une dysfonction contractile et une rigidité cardiaque à une rigidité aortique ou une atteinte microvasculaire et liées à des processus de fibrose et de surcharge lipidique permettent de découvrir des atteintes restées méconnues et peuvent permettre de préciser le risque cardiovasculaire individuel chez les patients diabétiques.

Mots-clés : IRM - Diabète - Déformation myocardique - Fibrose interstitielle - Rigidité aortique.

Summary

Cardiovascular magnetic resonance imaging (MRI), with constant technological innovations, allows *in vivo* imaging of a beating heart and pulsatile arteries with unparalleled anatomical coverage and contrast. This exploration can be performed at rest but also under pharmacological stress in order to detect often subclinical coronary heart disease in diabetic patients. Combined with advanced image processing methods, it also allows quantitative and multiparametric analysis of the central cardiocirculatory system, and it also gives access to a precise measurement of its geometry and function as well as its tissue and metabolic properties. The alteration of these MRI biomarkers at an early, infraclinical stage, makes them key elements in the exploration of diabetic cardiomyopathy. Indeed, the ability of MRI to explore in detail the functional alteration of the heart and vessels associated with contractile dysfunction and cardiac rigidity with aortic stiffness or microvascular damage and linked to fibrosis and lipid overload processes, make it possible to discover conditions that were unrecognized and can help to clarify the individual cardiovascular risk in diabetic patients.

Keywords: MRI - Diabetes - Myocardial strain - Interstitial fibrosis - Aortic stiffness.

1. Imagerie par résonance magnétique : une modalité multiparamétrique

L'intérêt décisif de l'imagerie par résonance magnétique (IRM) réside dans sa capacité à fournir de façon non invasive et non ionisante une imagerie *in vivo* au contraste tissulaire inégalé couplé avec une excellente couverture anatomique qui permet une imagerie intrinsèquement multiparamétrique du système cardiocirculatoire. En effet, l'IRM cardiovasculaire est une technique d'imagerie de référence pour l'évaluation clinique du remodelage et de la fonction cardiaque et artérielle, ainsi que l'imagerie myocardique des processus de nécrose et de fibrose d'origine ischémique ou non. Son champ d'application en recherche clinique a également été considérablement élargi vers l'exploration 3D+t des flux sanguins, la caractérisation tissulaire hautement sensible et quantitative par les techniques de cartographie T1 et T2, la perfusion quantitative et la caractérisation métabolique et moléculaire permises par la spectroscopie proton, phosphore et, dernièrement, au carbone 13 hyperpolarisé. Ces techniques d'IRM paraissent donc potentiellement centrales dans l'exploration de la cardiomyopathie diabétique.

2. Remodelage et fonction cardiaque

2.1. Remodelage myocardique et volumes ventriculaires

L'IRM est la méthode de référence pour l'évaluation des volumes cardiaques et de la masse myocardique grâce à des séquences dynamiques hautement résolues qui permettent d'acquérir, avec un excellent contraste entre le sang et les parois ventriculaires, des coupes jointives selon le petit et le grand axe du cœur et couvrant le cœur entier. Une qualité optimale peut être obtenue indépendamment de la morphologie thoracique, en particulier de l'obésité, qui rendent une exploration ultrasonore aléatoire. De nombreuses études IRM focalisées sur le ventricule gauche (VG) du patient diabétique de type 2 (DT2) ont montré un remodelage concentrique à un stade précoce alors même que la fraction d'éjection est préservée [1]. Ce remodelage concentrique du VG a été associé à un mauvais pronostic chez le patient diabétique, et en particulier une incidence plus élevée d'insuffisance cardiaque [2]. L'IRM a également été utilisée pour étudier le remodelage et les modifications géométriques de l'oreillette gauche (OG) ans le DT2 et qui ont été associées à une incidence accrue d'événements cardiovasculaires [3]. Ces études montrent souvent des variations minimales des volumes OG chez les patients diabétiques, avec cependant une altération de la fonction triphasique de l'oreillette (1 - phase de réservoir : dilatation passive de l'oreillette, induite par la pression du flux sanguin en provenance des poumons via les veines pulmonaires pendant la systole ventriculaire ; 2 - phase de conduit : contraction passive provoquée par l'ouverture de la valve mitrale (ou tricuspide pour le cœur droit), entre l'oreillette et le ventricule, induite par le gradient de pression entre les deux cavités pendant la proto-diastole ventriculaire ; 3 - phase de contraction atriale : contraction active de l'oreillette pendant la télé-diastole ventriculaire. Elle a pour rôle d'achever la vidange de l'oreillette et le remplissage du ventricule). En effet, Shang et al. [4] montrent que la fraction d'éjection atriale passive était la plus représentative de l'atteinte atriale chez le patient atteint d'un DT2. Graça et al. [5] montrent une réduction des fonctions conduit et réservoir de l'OG chez le patient diabétique asymptomatique. Dans la population générale de sujets adultes de plus de 45 ans de l'étude nord-américaine « Multi-Ethnic Study of Atherosclerosis » (MESA), il a été également montré que le volume minimal de l'OG, ainsi que les paramètres de fonction passive et active de l'OG, étaient plus fortement associés à la survenue de maladies cardiovasculaires que le volume maximal de l'OG, même après ajustement aux facteurs de risque

traditionnels, la masse VG et la partie N-terminale du peptide natriurétique de type B (NT-proBNP) [5].

2.2. Déformation myocardique multi-chambres

Plus récemment, ces mêmes données IRM, acquises de manière systématique à chaque examen sans nécessité de nouvelles séquences, ni injection de produits de contraste, ont été utilisées pour estimer la déformation myocardique (« strain ») et sa vitesse de déformation (« strain-rate ») dans les différentes cavités cardiaques, grâce à des méthodes de suivi de texture (« feature tracking ») au cours du cycle cardiaque (*figure 1*). Ces mesures sont reproductibles [6], capables de détecter les modifications cardiaques infracliniques liées à l'âge [7], et ont montré une association forte avec le taux de fibrose et de graisse mesuré en histologie [8] sur des prélèvements chirurgicaux au décours d'une atriotomie pour insuffisance valvulaire mitrale. Cette déformation peut être mesurée en longitudinal, circonférentiel et radial, et ce pour toutes les cavités cardiaques, avec une évaluation tri-phasique de la fonction atriale. Les études récentes centrées sur cette mesure de la déformation myocardique chez le patient atteint d'un DT2 en IRM montrent leur capacité à détecter l'atteinte myocardique à son stade précoce, à la fois sur le VG [9], le ventricule droit [10], et l'OG [10].

3. Caractérisation tissulaire et métabolisme

3.1. Fibrose myocardique de remplacement

L'IRM cardiaque se distingue des autres techniques par ses nombreuses séquences dédiées à la caractérisation du tissu et de la fibrose myocardiques. La technique la plus largement utilisée est celle de l'étude du rehaussement tardif (LGE) myocardique lié à une rétention de produit de contraste. Cette technique consiste à acquérir des images en coupe dans différents plans cardiaques couvrant le VG de son apex à sa base, 10 à 15 minutes après l'injection d'un produit de contraste gadoliné. Le gadolinium étant un agent extracellulaire, sa quantité dans le myocarde sain à 10 minutes de l'injection est minime, alors qu'elle est considérable dans l'espace extracellulaire de remplacement en cas de destruction cardiomyocytaire (infarctus du myocarde [IDM], myocardite, fibrose cicatricielle). Cette zone apparaît alors en hypersignal (blanc) sur les images IRM tardives (*figure 2*), tandis que le myocarde sain apparaît en hyposignal (noir) [11]. La présence de rehaussement tardif chez le patient diabétique sans preuves cliniques d'événement cardiaque est révélatrice d'un IDM silencieux et méconnu qui est associé à un mauvais pronostic [12,13], et ce indépendamment des données d'électrocardiographie et de fonction ventriculaire gauche, mesurée ou non en IRM.

3.2. Fibrose interstitielle et microcirculation myocardique

Au-delà de cette imagerie de la fibrose dense de remplacement, l'IRM cardiaque dispose aujourd'hui d'une nouvelle séquence dite « T1 mapping » ou de cartographie du T1 qui permet de caractériser la fibrose interstitielle (*figure 3*). La cartographie du T1 fournit une imagerie quantitative des temps de relaxation longitudinal dits T1 et peut être réalisée sans et avec injection de gadolinium. La combinaison des cartographies T1 pré- et post-injection avec le taux d'hématocrite du patient permet d'estimer le volume extracellulaire. Les paramètres quantitatifs du T1 permettent de différencier les patients ayant une cardiomyopathie des sujets sains, qu'elle que soit la fraction d'éjection. Ces données de quantification de la fibrose interstitielle en IRM sont aussi corrélées aux capacités d'exercice, à la dysfonction cardiaque infraclinique, à l'analyse histologique du myocarde, ainsi qu'au pronostic cardiovasculaire du patient [14,15]. Par ailleurs, il a été montré chez le patient

diabétique sans rehaussement tardif que la présence de fibrose interstitielle caractérisée par la cartographie T1 était associée à une dysfonction diastolique et systolique longitudinale du VG [16]. Levelt et al. [17] ont réalisé une cartographie du T1 sans injection, au repos et sous stress pharmacologique, révélant un taux d'augmentation du T1 natif sous stress chez les patients atteints d'un DT2 non coronariens et non hypertendus inférieur à l'augmentation constatée chez des sujets sains appariés, démasquant ainsi une probable dysfonction microvasculaire chez les sujets diabétiques. Celle-ci, longtemps discutée dans la littérature comme étiologie possible de la dysfonction myocardique dans la population diabétique, souffrait d'un manque de preuves de son existence formelle. L'IRM myocardique revisite ainsi ce concept important, en permettant de démasquer les patients potentiellement à risque d'évoluer vers l'insuffisance cardiaque sans atteinte macrovasculaire des coronaires. Une autre approche pouvant caractériser cette atteinte microvasculaire au niveau du myocarde du patient diabétique en IRM est la séquence de perfusion de premier passage acquise pendant l'injection intraveineuse du produit de contraste gadoliné, avant les acquisitions de rehaussement tardif et de cartographie T1 post-injection. Cette séquence permet de déterminer la perfusion du myocarde au cours du premier passage de l'agent de contraste. Des modifications de la cinétique de rehaussement du myocarde au premier passage du produit de contraste peuvent être observées en condition de repos et de stress et donner lieu à une quantification ou semi-quantification grâce à des techniques de traitement d'image. La quantification des paramètres de rehaussement (temps du pic de rehaussement, intensité maximale du signal) met en évidence l'atteinte macro- et microvasculaire induite par le diabète au niveau myocardique. En effet, Liu et al. [18] ont analysé les images de perfusion en IRM chez des volontaires sains et des patients atteints de DT2 diagnostiqués depuis plus, ou moins de 5 ans, révélant : un pic de rehaussement plus tardif et une intensité maximale moins élevée chez les diabétiques dans le stade précoce de leur maladie. Cette imagerie réalisée au repos et sous stress pharmacologique permet d'estimer la réserve de perfusion myocardique calculée comme le rapport entre le flux sanguin myocardique sous stress et au repos. Cette dernière était significativement réduite chez les patients diabétiques malgré l'absence de sténoses coronariennes > 30 % [19], suggérant une part significative d'atteinte microvasculaire.

3.3. Spectroscopie IRM et métabolisme myocardique *in vivo*

La spectroscopie par résonance magnétique, qui recueille le signal de résonance du proton (^1H) dans un volume d'intérêt du myocarde a également été utilisée pour mesurer la teneur en triglycérides du myocarde dans le DT2, reflétant ainsi la stéatose myocardique qui est présente chez le patient DT2, y compris avec fraction d'éjection préservée [20]. Cette stéatose a été associée à la dysfonction systolique (diminution de la déformation) et au remodelage concentrique du VG chez des patients DT2 non hypertendus [21], ainsi qu'à l'altération de la fonction diastolique VG [22,23]. Une autre étude récente, réalisée sur des patients atteints d'un DT2 et des volontaires sains, a montré que cette mesure de triglycérides était positivement associée à la baisse de la déformation et de la perfusion myocardiques [24]. Enfin, la stéatose myocardique présente dans le DT2 a été également associée à la diminution de la performance énergétique de la chaîne respiratoire du myocarde mesurée par spectroscopie IRM du phosphore 31 (^{31}P) via le rapport de la phosphocréatine à l'adénosine triphosphate (PCr/ATP) [21] qui est elle-même associée à un remodelage concentrique du VG. La même équipe a également

montré que ce déficit énergétique chez le patient DT2 est exacerbé sous stress et corrélé à un déficit de perfusion myocardique [25].

Parallèlement à la caractérisation du myocarde, l'IRM a également été utilisée pour identifier et quantifier la graisse épocardique (*figure 4*). La graisse épocardique, dont l'augmentation a été associée au DT2 et à la résistance à l'insuline, indépendamment de l'indice de masse corporelle (IMC) du patient, est liée à une diminution de la déformation systolique [26]. Une autre étude a montré que le volume de graisse épocardique était significativement plus élevé chez les insuffisants cardiaques et qu'il était associé à la présence d'une fibrillation atriale et d'un DT2 chez des insuffisants cardiaques avec une fraction d'éjection VG > 40 % [27].

4. Rigidité aortique et couplage aorte-ventricule gauche

L'IRM permet également de mesurer de nouveaux biomarqueurs de la rigidité locale et régionale de l'aorte thoracique (*figure 5*). La distensibilité aortique s'est avérée être un marqueur précoce du vieillissement vasculaire dans la population générale [28]. L'augmentation de la rigidité aortique proximale mesurée par IRM a été associée à une diminution de la fonction systolique et diastolique et à un remodelage concentrique du VG chez des sujets sains [29-33]. Enfin, la distensibilité aortique mesurée en IRM était prédictive de la mortalité et des événements cardiovasculaires, chez les individus à risque faible à intermédiaire sans maladie cardiovasculaire manifeste, au-delà des facteurs de risque traditionnels et des marqueurs de l'athérosclérose infracliniques, tels que le calcium coronarien et l'épaisseur de l'intima-média carotidienne [34]. De surcroît, la distensibilité aortique était altérée chez les patients atteints d'un diabète de type 1 asymptomatiques en lien avec un mauvais contrôle glycémique, en particulier chez les plus jeunes, une atteinte rénale (macroalbuminurie) et l'hypertension artérielle [35]. Le lien entre la rigidité aortique et le remodelage ventriculaire mesurés en IRM a également été étudié chez des patients avec un DT2 et sans maladies cardiovasculaires connues, indiquant que la distensibilité aortique était indépendamment associée au remodelage concentrique du VG [36].

La distensibilité aortique mesurée en IRM chez des patients DT2 avec un risque vasculaire faible est également indépendamment associée à un mauvais contrôle de la glycémie, ainsi qu'aux événements cardiovasculaires [37]. En outre, elle peut être réversible lors d'un traitement par inhibition du système rénine-angiotensine-aldostérone.

Conclusion

L'IRM myocardique est en train de révolutionner notre analyse du myocarde, non seulement sur le plan anatomique, mais également sur le plan fonctionnel. En effet, cette technique d'imagerie permet d'accéder à une plus grande précision d'analyse de la structure et composition du myocarde (fibrose, lipides, zones ischémiques ou infarctées passées cliniquement inaperçues) et de sa fonctionnalité (contractilité globale et segmentaire), bien au-delà de la seule mesure de la fraction d'éjection ventriculaire. De plus, la combinaison de cette analyse myocardique fine et de la rigidité aortique centrale permet une mise en évidence très précoce de l'atteinte cardiovasculaire, bien avant la survenue d'événements cliniques. La découverte de micro-infarctus passés inaperçus, d'une fibrose débutante ou d'une dysfonction contractile, peuvent permettre de reclasser des patients considérés *a priori* comme en prévention primaire vers un statut de prévention secondaire, ce qui change significativement la perception du risque cardiovasculaire et les stratégies

correspondantes de prise en charge individuelle. Ainsi, au-delà de la prouesse technique de l'analyse multiparamétrique d'un organe contractile *in vivo*, les informations mises à disposition par l'IRM trouvent aujourd'hui, dans l'exploration des conséquences cardiovasculaires du diabète, un champ d'application majeur.

Les points essentiels

- L'imagerie par résonance magnétique (IRM), technique d'imagerie non invasive, permet une imagerie précise et quantitative de deux organes cibles du diabète : le cœur et les artères.
- L'IRM permet une mesure quantitative des modifications géométriques, fonctionnelles, tissulaires (perfusion, fibrose et graisse) et métaboliques du myocarde.
- L'IRM permet une exploration des conséquences des altérations macrovasculaires et microvasculaires liées au diabète sur le cœur.
- L'IRM met en évidence des atteintes myocardiques ischémiques ou non ischémiques, avec ou sans atteinte macrovasculaire coronaire, et souvent asymptomatiques.
- La rigidité de l'aorte, mesurée *in vivo* en IRM est un biomarqueur prédictif de mortalité et d'événements cardiovasculaires chez des individus à risque cardiovasculaire *a priori* faible à intermédiaire.
- La rigidité aortique mesurée en IRM est fortement liée au remodelage concentrique du ventricule gauche.

Déclaration de liens d'intérêts

Les auteurs déclarent ne pas avoir de liens d'intérêts.

Références

1. Gulsin GS, Kanagala P, Chan DC, et al. Differential left ventricular and left atrial remodelling in heart failure with preserved ejection fraction patients with and without diabetes. *Ther Adv Endocrinol Metab* 2019; 10:204201881986159. eCollection 2019.
2. Gilca GE, Stefanescu G, Badulescu O, et al. Diabetic cardiomyopathy: current approach and potential diagnostic and therapeutic targets. *J Diabetes Res* 2017; 2017:1310265.
3. Markman TM, Habibi M, Venkatesh BA, et al. Association of left atrial structure and function and incident cardiovascular disease in patients with diabetes mellitus: results from multi-ethnic study of atherosclerosis (MESA). *Eur Heart J Cardiovasc Imaging* 2017; 18:1138-44.
4. Shang Y, Zhang X, Leng W, et al. Left atrium passive ejection fraction is the most sensitive index of type 2 diabetes mellitus-related cardiac changes. *Int J Cardiovasc Imaging* 2018; 34:141-51.
5. Graça B, Ferreira MJ, Donato P, et al. Left atrial dysfunction in type 2 diabetes mellitus: insights from cardiac MRI. *Eur Radiol* 2014; 24:2669-76.
6. Lamy J, Soulat G, Evin M, et al. Scan-rescan reproducibility of ventricular and atrial MRI feature tracking strain. *Comput Biol Med* 2018; 92:197-203.
7. Evin M, Redheuil A, Soulat G, et al. Left atrial aging: a cardiac magnetic resonance feature-tracking study. *Am J Physiol Heart Circ Physiol* 2016; 310:H542-9.
8. Huber AT, Lamy J, Rahhal A, et al. Cardiac MR strain: a noninvasive biomarker of fibrofatty remodeling of the left atrial myocardium. *Radiology* 2018; 286:83-92.
9. Xie LJ, Dong ZH, Yang ZG, et al. Assessment of left ventricular deformation in patients with type 2 diabetes mellitus by cardiac magnetic resonance tissue tracking. *Sci Rep* 2020; 10:13126.
10. Shao G, Cao Y, Cui Y, et al. Early detection of left atrial and bi-ventricular myocardial strain abnormalities by MRI feature tracking in normotensive or hypertensive T2DM patients with preserved LV function. *BMC Cardiovasc Disord* 2020; 20:196.
11. Kim RJ, Wu E, Rafael A, et al. The use of contrast-enhanced magnetic resonance imaging to identify reversible myocardial dysfunction. *N Engl J Med* 2000; 343:1445-53.
12. Kwong RY, Sattar H, Wu H, 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* 2008; 118:1011-20.
13. Yang Y, Li W, Zhu H, et al. Prognosis of unrecognized myocardial infarction determined by electrocardiography or cardiac magnetic resonance imaging: systematic review and meta-analysis. *BMJ* 2020; 369:m1184.
14. Kammerlander AA, Marzluf BA, Zotter-Tufaro C, et al. T1 mapping by CMR imaging: from histological validation to clinical implication. *JACC Cardiovasc Imaging* 2016; 9:14-23.
15. Puntmann VO, Carr-White G, Jabbour A, et al; International T1 Multicentre CMR Outcome Study. T1-mapping and outcome in nonischemic cardiomyopathy: all-cause mortality and heart failure. *JACC Cardiovasc Imaging* 2016; 9:40-50 [Erratum in: *JACC Cardiovasc Imaging* 2017; 10:384].

16. Ng AC, Auger D, Delgado V, et al. Association between diffuse myocardial fibrosis by cardiac magnetic resonance contrast-enhanced T₁ mapping and subclinical myocardial dysfunction in diabetic patients: a pilot study. *Circ Cardiovasc Imaging* 2012; 5:51-9 [Erratum in: *Circ Cardiovasc Imaging* 2012; 5:e25].
17. Levelt E, Piechnik SK, Liu A, et al. Adenosine stress CMR T₁-mapping detects early microvascular dysfunction in patients with type 2 diabetes mellitus without obstructive coronary artery disease. *J Cardiovasc Magn Reson* 2017; 19:81 [Erratum in: *J Cardiovasc Magn Reson* 2017; 19:89].
18. Liu X, Yang ZG, Gao Y, et al. Left ventricular subclinical myocardial dysfunction in uncomplicated type 2 diabetes mellitus is associated with impaired myocardial perfusion: a contrast-enhanced cardiovascular magnetic resonance study. *Cardiovasc Diabetol* 2018; 17:139.
19. Larghat AM, Swoboda PP, Biglands JD, et al. The microvascular effects of insulin resistance and diabetes on cardiac structure, function, and perfusion: a cardiovascular magnetic resonance study. *Eur Heart J Cardiovasc Imaging* 2014; 15:1368-76.
20. McGavock JM, Lingvay I, Zib I, et al. Cardiac steatosis in diabetes mellitus: a ¹H-magnetic resonance spectroscopy study. *Circulation* 2007; 116:1170-5.
21. Levelt E, Mahmood M, Piechnik SK, et al. Relationship between left ventricular structural and metabolic remodeling in type 2 diabetes. *Diabetes* 2016; 65:44-52.
22. Rijzewijk LJ, van der Meer RW, Smit JW, et al. Myocardial steatosis is an independent predictor of diastolic dysfunction in type 2 diabetes mellitus. *J Am Coll Cardiol* 2008; 52:1793-9.
23. Korosoglou G, Humpert PM, Ahrens J, et al. Left ventricular diastolic function in type 2 diabetes mellitus is associated with myocardial triglyceride content but not with impaired myocardial perfusion reserve. *J Magn Reson Imaging* 2012; 35:804-11.
24. Gao Y, Ren Y, Guo YK, et al. Metabolic syndrome and myocardium steatosis in subclinical type 2 diabetes mellitus: a ¹H-magnetic resonance spectroscopy study. *Cardiovasc Diabetol* 2020; 19:70.
25. Levelt E, Rodgers CT, Clarke WT, et al. Cardiac energetics, oxygenation, and perfusion during increased workload in patients with type 2 diabetes mellitus. *Eur Heart J* 2016; 37:3461-9.
26. Levelt E, Pavlides M, Banerjee R, et al. Ectopic and visceral fat deposition in lean and obese patients with type 2 diabetes. *J Am Coll Cardiol* 2016; 68:53-63.
27. van Woerden G, Gorter TM, Westenbrink BD, et al. Epicardial fat in heart failure patients with mid-range and preserved ejection fraction. *Eur J Heart Fail* 2018; 20:1559-66.
28. Redheuil A, Yu WC, Wu CO, et al. Reduced ascending aortic strain and distensibility: earliest manifestations of vascular aging in humans. *Hypertension* 2010; 55:319-26.
29. Redheuil A, Yu WC, Mousseaux E, et al. Age-related changes in aortic arch geometry: relationship with proximal aortic function and left ventricular mass and remodeling. *J Am Coll Cardiol* 2011; 58:1262-70.
30. Redheuil A, Kachenoura N, Bollache E, et al. Left ventricular and proximal aorta coupling in magnetic resonance imaging: aging together? *Am J Physiol Heart Circ Physiol* 2019; 317:H300-7.

31. Bollache E, Kachenoura N, Lang RM, et al. Abnormalities in aortic properties: a potential link between left ventricular diastolic function and ventricular-aortic coupling in sickle cell disease. *Int J Cardiovasc Imaging* 2016; 32:965-73.
32. Bollache E, Kachenoura N, Bargiotas I, et al. How to estimate aortic characteristic impedance from magnetic resonance and applanation tonometry data? *J Hypertens* 2015; 33:575-82; discussion 583.
33. Bargiotas I, Bollache E, Mousseaux E, et al. MR and applanation tonometry derived aortic impedance: association with aging and left ventricular remodeling. *J Magn Reson Imaging* 2015; 41:781-7.
34. Redheuil A, Wu CO, Kachenoura N, et al. Proximal aortic distensibility is an independent predictor of all-cause mortality and incident CV events: the MESA study. *J Am Coll Cardiol* 2014; 64:2619-29.
35. Turkbey EB, Redheuil A, Backlund JY, et al; Diabetes Control and Complications Trial/Epidemiology of Diabetes Interventions and Complications Research Group. Aortic distensibility in type 1 diabetes. *Diabetes Care* 2013; 36:2380-7.
36. Gulsin GS, Swarbrick DJ, Hunt WH, et al. Relation of aortic stiffness to left ventricular remodeling in younger adults with type 2 diabetes. *Diabetes* 2018; 67:1395-400.
37. Swoboda PP, Erhayiem B, Kan R, et al. Cardiovascular magnetic resonance measures of aortic stiffness in asymptomatic patients with type 2 diabetes: association with glycaemic control and clinical outcomes. *Cardiovasc Diabetol* 2018; 17:35.

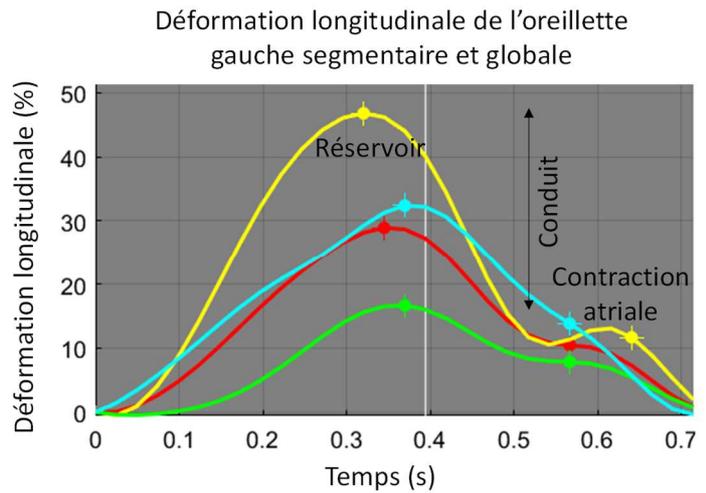
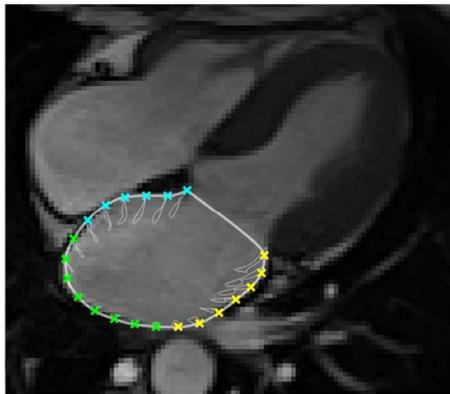


Figure 1. Analyse de texture pour l'estimation automatisée de la déformation de l'oreillette gauche au cours du cycle cardiaque en imagerie par résonance magnétique (IRM).

L'image 4 cavités de gauche correspond à une phase du cycle cardiaque de la séquence ciné analysée. À droite, sont illustrées les courbes de déformation globale (rouge) et segmentaire (couleurs associées aux segments délimités sur l'image de gauche). Les trois phases de la déformation atriale sont illustrées sur les courbes (Analyse réalisée par le logiciel académique Cardio-Track ; Laboratoire d'Imagerie Biomédicale, Sorbonne Université).

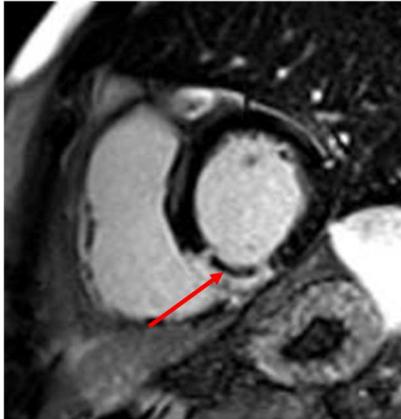
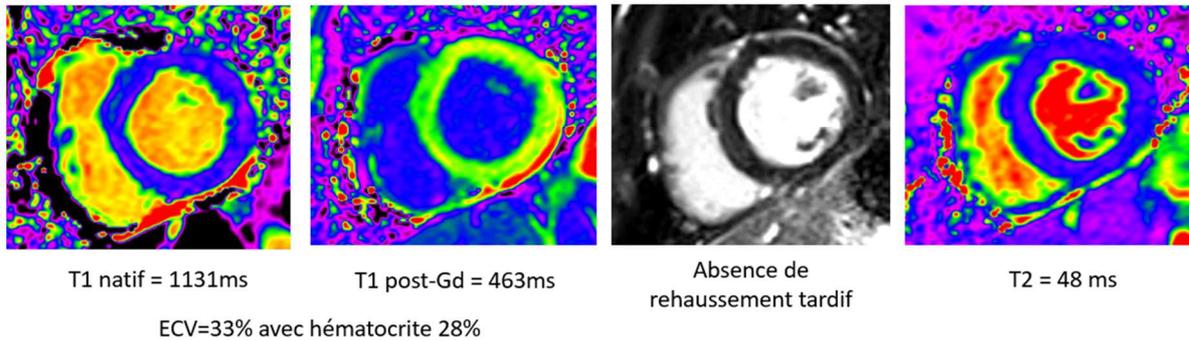


Figure 2. Image IRM de rehaussement tardif d'un patient ayant un infarctus du myocarde inféro-septal transmural, non viable, avec une obstruction microvasculaire (en sombre dans la zone de rehaussement, indiquant une obstruction totale au passage du produit de contraste, phénomène de « no-reflow »). Le myocarde sain apparait en noir, indiquant une élimination complète du produit de contraste 10 minutes après injection.

Patient de 50 ans, diabète de type 2 en insuffisance cardiaque, dysfonction systolique avec FEVG à 35%.
L'IRM révèle l'absence d'IDM mais un syndrome interstitiel sans œdème en faveur d'une fibrose interstitielle diffuse avec minime épanchement péricardique.



Supprimer la légende en haut de la fig. 3 - utiliser celle-ci-dessous

Figure 3. Patient âgé de 50 ans, diabétique de type 2 en insuffisance cardiaque, dysfonction systolique avec fraction d'éjection ventriculaire gauche à 35 %. L'imagerie par résonance magnétique (IRM) révèle l'absence d'infarctus du myocarde, mais un syndrome interstitiel sans œdème en faveur d'une fibrose interstitielle diffuse avec minime épanchement péricardique.

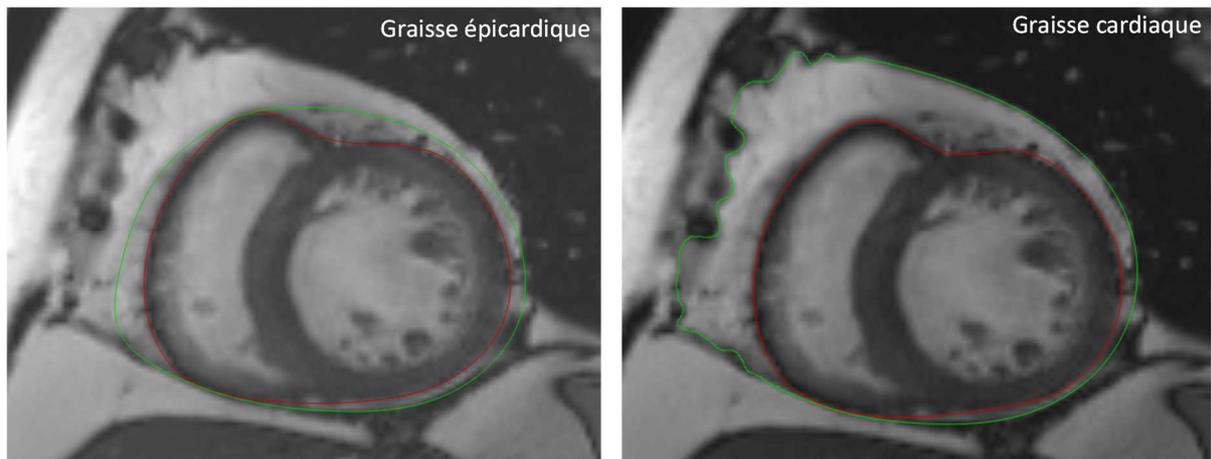


Figure 4. Délimitation de la graisse épicardique (à gauche) et de la graisse cardiaque totale (à droite) sur une image ciné petit axe en imagerie par résonance magnétique (IRM).

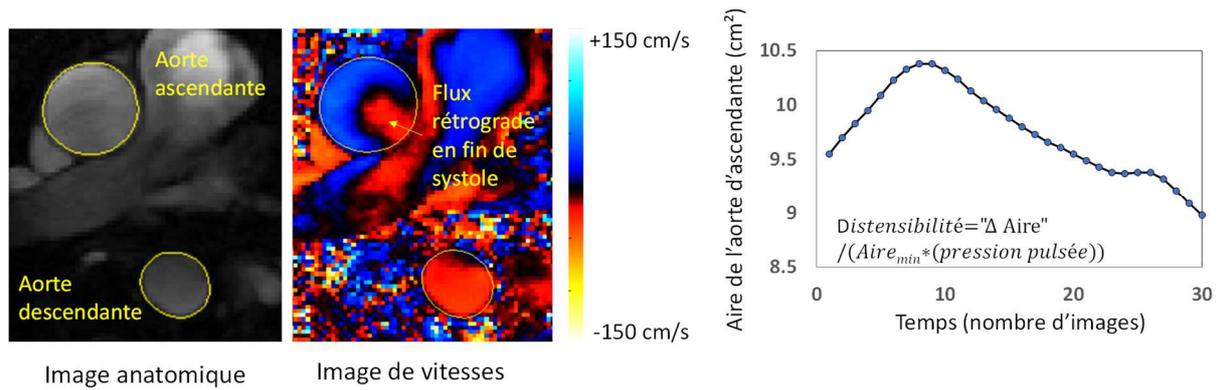


Figure 5. Images IRM anatomique (à gauche) et de vitesses à travers plan (au milieu) acquises au niveau de l'aorte ascendante et descendante. Une segmentation automatisée des images anatomique et de vitesses au cours du cycle cardiaque donne accès aux mesures de débit (global, rétrograde, antérograde), ainsi qu'à la variation de l'aire aortique au cours du temps (à droite). Cette dernière permet de mesurer la déformation aortique au cours du cycle cardiaque, et la combinaison de cette déformation à la mesure de pression pulsée centrale fournit la distensibilité aortique qui est une mesure locale de la rigidité artérielle (Analyse réalisée par la logiciel Art-Fun ; Laboratoire d'Imagerie Biomédicale, Sorbonne Université).