



HAL
open science

Imagerie cardiaque avant resynchronisation biventriculaire

Charl lie Erhart, Thibaut Lapotre, Nicolas Courtial, Pierre-Axel Lentz, Elise Bannier, Elena Galli, Christophe Leclercq, Erwan Donal, Mathieu Lederlin

► **To cite this version:**

Charl lie Erhart, Thibaut Lapotre, Nicolas Courtial, Pierre-Axel Lentz, Elise Bannier, et al.. Imagerie cardiaque avant resynchronisation biventriculaire. *Journal d'imagerie diagnostique et interventionnelle*, 2021, 4 (1), pp.56-65. 10.1016/j.jidi.2020.08.002 . hal-03269457

HAL Id: hal-03269457

<https://univ-rennes.hal.science/hal-03269457>

Submitted on 13 Feb 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   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

Imagerie cardiaque avant resynchronisation bi-ventriculaire

Imaging before Cardiac Resynchronization Therapy

Charl lie ERHART (1), Thibaut LAPOTRE (1), Nicolas COURTIAL (2), Pierre-Axel LENTZ (1), Elise BANNIER (3), Elena GALLI (2, 4), Christophe LECLERCQ (2, 4), Erwan DONAL (2, 4), Mathieu LEDERLIN (1, 2)

1. Service de radiologie, CHU Rennes, 2, rue Henri-Le-Guilloux, 35033 Rennes cedex 9, France

2. LTSI, INSERM U1099, Université de Rennes 1, Campus de Beaulieu, 35042 Rennes, France

3. Unité Empenn U1228, INSERM-INRIA, IRISA UMR CNRS 6074, Campus de Beaulieu, 35042 Rennes, France

4. Service de cardiologie, CHU de Rennes, 2, rue Henri-Le-Guilloux, 35033 Rennes cedex 9, France

Auteur correspondant : Mathieu Lederlin, Service de radiologie, CHU de Rennes, 2, rue Henri-Le-Guilloux, 35033 Rennes cedex 9, France.

Adresse e-mail : mathieu.lederlin@chu-rennes.fr

Résumé

La resynchronisation cardiaque (CRT - Cardiac Resynchronization Therapy) fait partie de l'arsenal thérapeutique dans l'insuffisance cardiaque terminale. Cette technique consiste à implanter deux sondes stimulant de façon synchrone les ventricules droit et gauche et ainsi améliorer l'hémodynamique cardiaque. À ce jour, la CRT est réservée aux patients en rythme sinusal avec une FEVG <35% et un asynchronisme électrique défini par un QRS >150ms et un aspect de bloc de branche gauche. Cependant, 30 à 40% des patients ainsi sélectionnés sont non répondeurs, preuve de la perfectibilité des critères de sélection. Actuellement, les radiologues sont sollicités dans un bilan pré-CRT essentiellement pour faire une IRM cardiaque et déterminer précisément la FEVG. Cependant, l'évolution des techniques d'imagerie, aussi bien échocardiographiques que IRM et TDM, a permis l'émergence de nouveaux paramètres susceptibles d'améliorer la sélection des patients et d'espérer à terme un meilleur taux de réponse à la CRT. Ces paramètres sont par exemple l'étude de l'asynchronisme mécanique, l'analyse des cicatrices macroscopiques et de la fibrose interstitielle myocardique, ou encore l'étude de l'anatomie veineuse coronaire. Ces informations peuvent être combinées voire fusionnées afin de stratifier plus précisément les patients et/ou de proposer une assistance per-procédure aux cardiologues lors de l'implantation. Nous nous proposons dans cet article de passer en revue les différentes techniques et méthodes d'imagerie qui, au-delà des critères de sélection actuellement recommandés, pourraient permettre d'affiner la sélection des patients et d'améliorer leur réponse à la CRT dans le futur.

Mots-clés : Insuffisance cardiaque ; Resynchronisation cardiaque ; Echocardiographie ; Imagerie par résonance magnétique ; Tomodensitométrie.

Summary

Cardiac Resynchronization Therapy (CRT) is part of the therapeutic armamentarium in end-stage heart failure. It consists in implanting two leads that synchronously stimulate the right and left ventricles and thus improve cardiac hemodynamics. To date, CRT is reserved for patients in sinus rhythm with LVEF <35% and electrical ventricular dyssynchrony defined by a QRS >150ms and a left bundle branch block. However, 30 to 40% of the patients are non-responders to CRT, which suggests that the selection criteria can be improved. Currently, radiologists are requested in a pre-CRT work-up mainly to perform cardiac MRI and to

quantify LVEF. However, the development of ultrasound, MRI and CT cardiac techniques, has made it possible to study new parameters that could improve the selection of patients and to hope for a better response rate to CRT. These parameters may be mechanical dyssynchrony, myocardial scar and interstitial fibrosis, or coronary venous anatomy. These data can be combined or even merged in order to stratify patients more precisely and/or to serve as a guide for CRT implantation. In this article, we propose to review the various imaging techniques which, beyond the current guidelines, could help to refine patient selection and improve their response to CRT in the future.

Keywords: Heart failure; Cardiac Resynchronization Therapy; Ultrasonography; Magnetic Resonance Imaging; Computed tomography.

Introduction

Depuis la première publication rapportant en 1994 l'intérêt d'une stimulation 4 chambres chez un patient insuffisant cardiaque avec cardiomyopathie dilatée (1), puis en 1998 la première série confirmant les bénéfiques hémodynamiques d'une stimulation bi-ventriculaire chez les patients en insuffisance cardiaque terminale (2), la resynchronisation cardiaque (ou CRT : cardiac resynchronization therapy) fait désormais partie de l'arsenal thérapeutique de l'insuffisance cardiaque terminale. Les patients bénéficiant de la CRT sont ceux ayant une fonction systolique du ventricule gauche (VG) altérée associée à un asynchronisme de contraction intra-ventriculaire gauche lequel consiste en une activation précoce de la paroi septale suivie d'une activation retardée de la paroi latérale. Cet asynchronisme se traduit électriquement par un élargissement du QRS avec aspect de bloc de branche gauche. Le principe de la CRT repose sur la stimulation synchrone de la paroi septale du VG via une sonde ventriculaire droite et de la paroi latérale via une sonde positionnée dans une veine coronaire.

Actuellement, les critères d'éligibilité à la CRT sont les suivants : rythme sinusal, fraction d'éjection du ventricule gauche (FEVG) $\leq 35\%$ malgré traitement médical optimal, et QRS $> 150\text{ms}$ avec aspect de bloc de branche gauche (recommandations de grade A) (3). L'imagerie n'intervient donc pas pour sélectionner les patients en dehors de l'échographie trans-thoracique (ETT) ou l'IRM pour mesurer la FEVG. Ces critères de sélection sont probablement imparfaits car 30 à 40% des patients ne répondent pas à la CRT (4,5). La sélection des patients sur la base d'un asynchronisme électrique (élargissement du QRS) plutôt que d'un asynchronisme mécanique se justifie entre autres par le caractère extrêmement

reproductible de l'ECG comparativement aux techniques d'imagerie plus complexes et moins standardisées. Cependant, certains patients à QRS étroit peuvent présenter un véritable asynchronisme mécanique (6) tandis que jusqu'à 30% des patients avec QRS > 150ms pourraient ne pas avoir d'asynchronisme mécanique (7). Il a aussi été montré une amélioration par la CRT chez des patients à QRS étroits (< 130ms) avec asynchronisme mécanique échocardiographique (8).

Dans ce contexte, il est légitime de chercher à affiner les critères de sélection, ce afin de mieux dépister les patients pouvant bénéficier de la CRT et diminuer le nombre de patients non répondeurs. En effet, la CRT n'est pas dénuée de risque - jusqu'à 13% de complications dans les 30 jours qui suivent l'implantation (9) - et c'est une procédure coûteuse - 52 000 \$ en moyenne par patient dans la récente étude BLOCK-HF (10).

L'évolution des techniques d'imagerie en coupe au cours des deux dernières décennies a permis d'importants progrès dans la quantification de l'asynchronisme mécanique mais également dans l'évaluation d'autres paramètres pouvant avoir un impact sur le succès de la CRT : étude de la fibrose macro ou microscopique en IRM, cartographie veineuse coronaire en scanner.

Les radiologues peuvent donc être sollicités par les cardiologues dans le bilan pré-CRT. Nous proposons ici un état des lieux des différentes techniques d'imagerie cardiaque présentant un intérêt actuel ou futur dans le bilan pré-resynchronisation des patients insuffisants cardiaques.

Modalités d'imagerie

Échocardiographie

Réalisée par les cardiologues, l'échographie cardiaque est la technique d'imagerie la plus utilisée dans le bilan pré-CRT, en raison de sa large diffusion, son coût modéré, son innocuité et sa portabilité au lit du malade. C'est de loin la modalité d'imagerie qui a fait l'objet du plus grand nombre de publications (plus de 600 articles portant sur les critères mécaniques d'asynchronisme échocardiographique). L'échographie permet d'étudier un certain nombre de paramètres d'asynchronisme mécanique en pré-procédure. Mais c'est aussi la technique de choix pour évaluer, en parallèle de la clinique, la réponse à la CRT via la mesure du remodelage inverse (défini comme une baisse du volume télésystolique > 15% en post-procédure).

Les premières études sur l'asynchronisme échocardiographique étaient basées sur des paramètres ETT en mode temps-mouvement (TM) ou doppler tissulaire (DTI) mais souffraient d'effectifs faibles, d'un design monocentrique et globalement d'un manque de reproductibilité dans la mesure des paramètres étudiés (11). C'est dans un but d'uniformisation des pratiques qu'a été lancée entre 2004 et 2005 l'étude PROSPECT, première étude multicentrique ayant étudié les facteurs échographiques prédictifs de réponse à la CRT, ce qui à l'époque avait suscité beaucoup d'espoir (12). Dans cette étude, 12 paramètres ETT ont été analysés en mode TM, DTI ou doppler pulsé. Malheureusement, aucun de ces paramètres n'a été capable de prédire de façon fiable la réponse à la CRT selon un score clinique composite (aires sous la courbe < 0.62), ceci en partie du fait d'une variabilité inter-observateur trop importante ($\kappa = 0.15 - 0.67$).

Après les déconvenues de PROSPECT, un nouveau paramètre échocardiographique plus reproductible a relancé l'ETT dans le bilan pré-CRT : l'imagerie de strain par « speckle tracking ». C'est une technique qui permet de suivre en temps réel la déformation du myocarde en échocardiographie 2D, et d'extraire ainsi des paramètres tels que le « strain » et le « strain rate ». Deux études importantes publiées en 2010 (13) et 2012 (14) ont montré les performances du strain échocardiographique dans la sélection des patients. Dans l'étude STAR (13), sur une population de 132 patients, le strain radial avait une sensibilité de 86% pour prédire une réponse positive à la resynchronisation cardiaque (basée sur une amélioration de la FEVG et l'absence d'évènements majeurs tels que décès, transplantation ou implantation d'un matériel d'assistance ventriculaire gauche). L'étude TARGET (14) consistait quant à elle à évaluer la réponse clinique et échocardiographique dans une population de 220 patients séparés en deux groupes : ceux ayant bénéficié d'une stimulation ventriculaire gauche ciblant la paroi activée tardivement en strain, et ceux ayant bénéficié d'une procédure standard sans ciblage particulier de l'électrode. Les patients ayant bénéficié d'une procédure ciblée avaient significativement mieux répondu à la resynchronisation cardiaque que les autres (83% vs 65%, $p = 0.003$).

Néanmoins, l'asynchronisme mécanique semble rester moins prédictif que l'asynchronisme électrique concernant la réponse à la CRT. Ainsi, l'étude de Rutschitzka et al. publiée en 2013 (15), menée sur une population de patients avec asynchronisme mécanique en strain mais sans asynchronisme électrique (QRS < 130ms) a été arrêté prématurément en raison d'une possible augmentation de la mortalité dans cette sous-population.

Au total, malgré l'apport incontestable du strain échographique, l'asynchronisme mécanique en ETT n'est toujours pas retenu dans les recommandations internationales comme critère de sélection des patients à la CRT.

IRM

Actuellement, en pratique courante, les demandes d'IRM dans les bilans pré-CRT sont essentiellement motivées par la mesure précise de la FEVG, pour déterminer si celle-ci est supérieure ou inférieure à 35% (16). L'IRM, technique gold standard dans la mesure des volumes ventriculaires, permet donc de statuer sur l'éligibilité ou pas d'un patient à la CRT. Cependant, les informations délivrées par l'IRM ne se limitent pas à la mesure des volumes ventriculaires. Comme l'ETT elle permet d'analyser l'asynchronisme mécanique selon plusieurs méthodes plus ou moins complexes. L'IRM a aussi la capacité unique d'identifier la cicatrice fibreuse ce qui constitue une information fondamentale avant d'envisager une procédure de resynchronisation cardiaque.

Étude de l'asynchronisme en IRM

Plusieurs méthodes existent en IRM pour étudier l'asynchronisme mécanique du VG.

Analyse visuelle

C'est le niveau d'analyse le plus rudimentaire, correspondant à la transposition en IRM de deux signes échocardiographiques largement décrits (17) :

Le « septal flash » (Figure 1) est une contraction très brève et prématurée du septum en tout début de systole. L' « apical rocking » (Figure 1) est un mouvement de balancement de l'apex ventriculaire gauche au cours de la systole : dans un premier temps la contraction septale précoce attire l'apex vers le septum, puis la contraction plus tardive de la paroi latérale attire à elle l'apex du VG tandis que le septum se détend (18). Ces deux marqueurs d'asynchronisme intra-ventriculaire gauche sont préférentiellement rencontrés dans les cardiomyopathies dilatées non ischémiques avec bloc de branche gauche. Ils se voient facilement en IRM pour peu que la résolution temporelle soit suffisante (25 images/seconde).

Tagging myocardique

C'est une technique décrite pour la première fois en 1988, permettant de quantifier les mouvements cardiaques (19). Elle consiste à appliquer sur les séquences ciné SSFP une grille

de radiofréquence qui réalise un tatouage du myocarde. La contraction myocardique va déformer cette grille (Figure 2), et ces déformations vont pouvoir être mesurées pour en extraire des paramètres quantitatifs.

Longtemps considérée comme la technique de référence pour la quantification des déformations, le tagging n'est jamais réellement passé dans la pratique courante, principalement du fait d'une résolution spatiale limitée et de la complexité des méthodes de post-traitement nécessaires. Pourtant, le tagging myocardique a montré sa capacité à quantifier l'asynchronisme et prédire le remodelage inverse du VG en post-CRT (20).

Vélocité myocardique par contraste de phase

C'est la technique de vélocimétrie par contraste de phase appliquée non pas à la mesure de vitesse des vaisseaux mais des tissus myocardiques (21). Il s'agit en quelque sorte du pendant en IRM du Doppler tissulaire échocardiographique. Comme pour le tagging myocardique, cette technique n'a jamais réellement percé, essentiellement à cause de sa résolution temporelle limitée et d'un temps d'acquisition nécessitant des apnées longues.

Encodage direct des déplacements myocardiques

Le concept de la séquence DENSE (Displacement ENcoding with Stimulated Echoes) est similaire à celui de la vélocimétrie tissulaire par contraste de phase, mais ici c'est le déplacement du tissu qui est directement encodé, et non la vitesse (22). Cette technique combine les avantages des deux précédentes en permettant une amélioration de la résolution spatiale et temporelle. La séquence DENSE est particulièrement pertinente pour l'évaluation du strain circonférentiel, que l'on peut quantifier grâce à l'indice CURE (Circumferential Uniformity Ratio Estimate), allant de 0 (asynchronisme maximal) à 1 (contraction synchrone). Une étude réalisée sur 75 patients a objectivé une différence très nette de cet indice entre les patients répondeurs à la CRT et ceux non répondeurs (0.37 vs 0.75 ; $p < 0.001$) (23).

Le "feature tracking"

Technique la plus récente et la plus prometteuse, le « feature tracking » a l'avantage de la simplicité car il s'agit d'un post-traitement qui s'applique aux séquences ciné SSFP acquises en routine. De façon un peu similaire au speckle échocardiographique, elle consiste en un suivi de « patches » ou motifs (agencements de pixels) sur les images SSFP au cours des phases du cycle cardiaque (24). Le logiciel délivre ainsi des valeurs de strain circonférentiel,

longitudinal ou radial reflétant les déformations de chaque segment myocardique (Figure 3). Son utilisation dans le bilan pré-CRT n'a pas encore fait l'objet de beaucoup de publications. Les études comparatives avec les méthodes de speckle tracking, TAG ou encore DENSE montrent une bonne concordance (25), voire la possibilité d'objectiver en feature tracking des anomalies non visibles en speckle (26). Le feature tracking serait particulièrement fiable pour le strain circonférentiel et longitudinal.

Au total, l'IRM permet d'étudier l'asynchronisme mécanique selon plusieurs méthodes mais la plupart d'entre elles sont insuffisamment diffusées et standardisées. Le « feature tracking » semble la plus prometteuse, sous réserve que la résolution temporelle puisse encore être améliorée. Contrairement à l'ETT, il n'y a pas eu de large étude prospective pour évaluer les performances de l'IRM dans la CRT. Les avantages ainsi que les inconvénients de l'IRM et de l'échographie pour la quantification de l'asynchronisme cardiaque sont résumés dans le tableau 1.

L'IRM au-delà de l'asynchronisme

Cicatrice myocardique

L'IRM est la méthode de référence pour l'étude du myocarde cicatriciel, objectivé grâce au rehaussement tardif post-gadolinium qui traduit une atteinte inflammatoire, nécrotique ou fibrosante. Cette information est capitale dans la resynchronisation cardiaque. Plus la cicatrice myocardique est étendue, moins l'on obtient de remodelage inverse après CRT, de même qu'un positionnement d'électrode en regard d'une zone de myocarde rehaussé donne de moins bonnes réponses thérapeutiques (27–30).

À côté de l'extension et de la topographie de la fibrose myocardique, sa répartition dans les différentes couches de la paroi myocardique a également une importance. La fibrose médio-murale ou « mid-wall » est caractéristique des cardiomyopathies dilatées primitives (Figure 4) et s'est révélée être un facteur prédictif de mortalité et morbidité chez ces patients après CRT (31). En revanche, elle pourrait constituer une bonne indication à l'implantation concomitante d'un défibrillateur implantable (32). L'étude du rehaussement tardif est donc fondamentale avant CRT, mais reste en pratique souvent gênée par des artefacts ou une résolution spatiale insuffisante. Par ailleurs, les séquences IRM de rehaussement tardif comme les techniques de post-traitement et quantification sont encore insuffisamment standardisées ce qui limite les possibilités d'études multicentriques.

T1 mapping

Le T1 mapping permet l'étude de la fibrose interstitielle, non visible sous-forme de cicatrice macroscopique, mais présente de façon diffuse dans le myocarde. Les données actuelles sur son intérêt dans le bilan pré-CRT sont contradictoires. Certains articles ne lui ont pas trouvé de valeur prédictive de réponse à la CRT (33) quand d'autres ont mis en évidence une association avec le remodelage inverse post CRT (34).

Anatomie veineuse coronaire

L'IRM possède ici un rôle plus anecdotique mais est toutefois capable de fournir une cartographie veineuse pré-implantatoire, sans l'irradiation du scanner mais avec une résolution spatiale moindre (35).

Angioscanner cardiaque

Anatomie veineuse coronaire

C'est l'intérêt principal du scanner avant CRT compte-tenu de certaines variantes anatomiques veineuses. Il a été montré qu'une cartographie précise de l'anatomie veineuse coronaire (Figure 5) réduisait le temps de procédure, le volume de produit de contraste et la dose d'irradiation lors de l'implantation (36). En pratique, l'intérêt du scanner des veines coronaires semble inversement proportionnel à l'expérience du cardiologue électrophysiologiste.

Asynchronisme mécanique

L'étude de l'asynchronisme mécanique est théoriquement possible en scanner (37), mais n'est pas réalisée en pratique du fait d'un manque de résolution temporelle (10-15 images / cycle), avec une acquisition qui reste par ailleurs irradiante puisque nécessitant de couvrir l'ensemble du cycle cardiaque.

Cicatrice myocardique

Même s'il est possible d'étudier la cicatrice myocardique en scanner, avec une bonne concordance par rapport aux données IRM, la technique souffre d'un moins bon rapport signal/bruit et a le défaut d'être irradiante (38).

Imagerie nucléaire

Dans la planification d'un geste de CRT, le rôle de l'imagerie nucléaire a été décrit mais reste marginal en pratique clinique. La détermination de l'asynchronisme mécanique et l'étude de la viabilité myocardique sont toutes deux possibles en tomographie monophotonique (30,39–41), mais ces techniques sont onéreuses, longues, et surtout souffrent d'un manque de résolution spatiale comparativement aux autres modalités.

Imagerie multimodale

La voie d'amélioration la plus prometteuse pour diminuer le nombre de patients non répondeurs à la CRT est probablement le recours à l'imagerie multimodale (42).

L'imagerie multimodale permet la fusion d'images acquises par différentes techniques pour établir des cartographies 3D voire 4D. Par exemple, fusionner sur une seule et même représentation l'information d'un angioscanner cardiaque pour avoir une anatomie veineuse précise et celle d'une cartographie IRM de fibrose myocardique (Figure 6).

Son intérêt est double : en pré-procédure, il est possible de prédire si une veine de bon calibre accessible à l'implantation d'électrode se situe effectivement dans une zone d'asynchronisme mécanique exempte de cicatrice myocardique, ce qui augmente la probabilité de succès clinique de la CRT. Mais son intérêt est également en per-procédure, avec la possibilité d'un guidage de l'implantation en fusionnant les images pré-procédures avec la scopie en temps réel, afin de faciliter le cathétérisme de la veine coronaire cible ou encore pour déterminer la position exacte des électrodes en fin de procédure.

L'évolution se fait donc vers des procédures « personnalisées » avec des patients mieux sélectionnés et des procédures plus précises. L'imagerie multimodalité pourrait permettre d'obtenir de meilleurs résultats cliniques que l'utilisation des critères issus des recommandations actuelles (42–45), cependant les niveaux de preuve restent pour l'heure encore faibles.

Apport de l'intelligence artificielle

L'intelligence artificielle est en plein essor et va probablement modifier en profondeur l'imagerie médicale et plus largement la médecine dans les années à venir.

Des études récentes ont montré que des algorithmes d'intelligence artificielle permettaient de mieux sélectionner les patients répondeurs que les recommandations actuelles (46,47). Dans

l'étude COMPANION, un algorithme basé sur des techniques d'apprentissage machine, utilisant 45 critères mais aucune donnée d'imagerie, a réussi à prédire le devenir clinique post CRT de façon plus efficace que les critères de sélection actuellement en vigueur (48). Seules de nouvelles études permettront d'affiner la place de l'imagerie dans la prise en charge de ces patients insuffisants cardiaques graves.

Conclusion

Même si la resynchronisation des patients insuffisants cardiaques est un sujet assez spécialisé, les radiologues doivent être conscients des potentialités présentes et futures de l'IRM et du scanner dans cette indication. L'asynchronisme mécanique, s'il n'est actuellement pas retenu comme critère de sélection des patients à la CRT, demeure, au moins intuitivement, un marqueur pronostique potentiel chez ces patients. L'ETT dans ce domaine possède actuellement une longueur d'avance grâce notamment à son excellente résolution temporelle et l'analyse du strain par speckle tracking. L'IRM se positionne cependant comme un challenger sérieux, non seulement pour l'analyse de l'asynchronisme par feature tracking, mais plus encore pour sa capacité à identifier, caractériser et quantifier la cicatrice myocardique. Ces différentes modalités d'imagerie sont probablement plus complémentaires que concurrentes, notamment grâce à la possibilité de fusion multimodale. Pour rester dans la course, l'imagerie en coupe doit faire un effort de standardisation à la fois des techniques d'acquisition et de post-traitement. Il est par ailleurs nécessaire de renforcer les collaborations entre radiologues et cardiologues afin de monter des essais de grande envergure intégrant toutes les techniques d'imagerie cardiaque.

Conflits d'intérêts

Les auteurs ne déclarent aucun conflit d'intérêt en rapport avec le sujet de l'article. Aucun fonds n'a été attribué pour la rédaction de l'article.

Références

1. Cazeau S, Ritter P, Bakdach S, Lazarus A, Limousin M, Henao L, et al. Four Chamber Pacing in Dilated Cardiomyopathy. *Pacing Clin Electrophysiol.* nov 1994;17(11):1974-9.
2. Leclercq C, Cazeau S, Le Breton H, Ritter P, Mabo P, Gras D, et al. Acute hemodynamic effects of biventricular DDD pacing in patients with end-stage heart failure. *J Am Coll Cardiol.* déc 1998;32(7):1825-31.
3. Ponikowski P, Voors AA, Anker SD, Bueno H, Cleland JGF, Coats AJS, et al. 2016 ESC Guidelines for the diagnosis and treatment of acute and chronic heart failure: The Task Force for the diagnosis and treatment of acute and chronic heart failure of the European Society of Cardiology (ESC) Developed with the special contribution of the Heart Failure Association (HFA) of the ESC. *Eur Heart J.* 14 juill 2016;37(27):2129-200.
4. Bristow MR, Saxon LA, Boehmer J, Krueger S, Kass DA, De Marco T, et al. Cardiac-resynchronization therapy with or without an implantable defibrillator in advanced chronic heart failure. *N Engl J Med.* 20 mai 2004;350(21):2140-50.
5. Cleland J, Freemantle N, Ghio S, Fruhwald F, Shankar A, Marijanowski M, et al. Predicting the long-term effects of cardiac resynchronization therapy on mortality from baseline variables and the early response a report from the CARE-HF (Cardiac Resynchronization in Heart Failure) Trial. *J Am Coll Cardiol.* 5 août 2008;52(6):438-45.
6. Yu C-M, Yang H, Lau C-P, Wang Q, Wang S, Lam L, et al. Regional left ventricle mechanical asynchrony in patients with heart disease and normal QRS duration: implication for biventricular pacing therapy. *Pacing Clin Electrophysiol PACE.* févr 2003;26(2 Pt 1):562-70.

7. Bax JJ, Molhoek SG, van Erven L, Voogd PJ, Somer S, Boersma E, et al. Usefulness of myocardial tissue Doppler echocardiography to evaluate left ventricular dyssynchrony before and after biventricular pacing in patients with idiopathic dilated cardiomyopathy. *Am J Cardiol.* 1 janv 2003;91(1):94-7.
8. Beshai JF, Grimm R. The resynchronization therapy in narrow QRS study (RethinQ study): methods and protocol design. *J Interv Card Electrophysiol Int J Arrhythm Pacing.* sept 2007;19(3):149-55.
9. Tang ASL, Wells GA, Talajic M, Arnold MO, Sheldon R, Connolly S, et al. Cardiac-Resynchronization Therapy for Mild-to-Moderate Heart Failure. *N Engl J Med.* 16 déc 2010;363(25):2385-95.
10. Chung ES, St. John Sutton MG, Mealing S, Sidhu MK, Padhiar A, Tsintzos SI, et al. Economic value and cost-effectiveness of biventricular versus right ventricular pacing: results from the BLOCK-HF study. *J Med Econ.* 3 oct 2019;22(10):1088-95.
11. Burri H, Muller H, Vieira I, Lerch R. Poor agreement of echographic measures of ventricular dyssynchrony. *Eur J Echocardiogr.* 8 mai 2007;S1525216707000716.
12. Chung ES, Leon AR, Tavazzi L, Sun J-P, Nihoyannopoulos P, Merlino J, et al. Results of the Predictors of Response to CRT (PROSPECT) Trial. *Circulation.* 20 mai 2008;117(20):2608-16.
13. Tanaka H, Nesser H-J, Buck T, Oyenuga O, Janosi RA, Winter S, et al. Dyssynchrony by speckle-tracking echocardiography and response to cardiac resynchronization therapy: results of the Speckle Tracking and Resynchronization (STAR) study. *Eur Heart J.* 2 juill 2010;31(14):1690-700.

14. Khan FZ, Virdee MS, Palmer CR, Pugh PJ, O'Halloran D, Elvik M, et al. Targeted Left Ventricular Lead Placement to Guide Cardiac Resynchronization Therapy. *J Am Coll Cardiol.* avr 2012;59(17):1509-18.
15. Ruschitzka F, Abraham WT, Singh JP, Bax JJ, Borer JS, Brugada J, et al. Cardiac-Resynchronization Therapy in Heart Failure with a Narrow QRS Complex. *N Engl J Med.* 10 oct 2013;369(15):1395-405.
16. Foley TA, Mankad SV, Anavekar NS, Bonnicksen CR, Morris MF, Miller TD, et al. Measuring left ventricular ejection fraction-techniques and potential pitfalls. *Eur Cardiol.* 1 janv 2012;8(2):108-14.
17. Ghani A, Delnoy PPHM, Ottervanger JP, Ramdat Misier AR, Smit JJJ, Adiyaman A, et al. Association of apical rocking with long-term major adverse cardiac events in patients undergoing cardiac resynchronization therapy. *Eur Heart J – Cardiovasc Imaging.* févr 2016;17(2):146-53.
18. Revah G, Wu V, Huntjens PR, Piekarski E, Chyou JY, Axel L. Cardiovascular magnetic resonance features of mechanical dyssynchrony in patients with left bundle branch block. *Int J Cardiovasc Imaging.* sept 2016;32(9):1427-38.
19. Zerhouni EA, Parish DM, Rogers WJ, Yang A, Shapiro EP. Human heart: tagging with MR imaging--a method for noninvasive assessment of myocardial motion. *Radiology.* oct 1988;169(1):59-63.
20. Sohal M, Duckett SG, Zhuang X, Shi W, Ginks M, Shetty A, et al. A prospective evaluation of cardiovascular magnetic resonance measures of dyssynchrony in the prediction of response to cardiac resynchronization therapy. *J Cardiovasc Magn Reson* 16;58 (2014).

21. Westenberg JJM, Lamb HJ, van der Geest RJ, Bleeker GB, Holman ER, Schalij MJ, et al. Assessment of Left Ventricular Dyssynchrony in Patients With Conduction Delay and Idiopathic Dilated Cardiomyopathy. *J Am Coll Cardiol*. mai 2006;47(10):2042-8.
22. Kim D, Gilson WD, Kramer CM, Epstein FH. Myocardial tissue tracking with two-dimensional cine displacement-encoded MR imaging: development and initial evaluation. *Radiology*. mars 2004;230(3):862-71.
23. Bilchick KC, Kuruvilla S, Hamirani YS, Ramachandran R, Clarke SA, Parker KM, et al. Impact of Mechanical Activation, Scar, and Electrical Timing on Cardiac Resynchronization Therapy Response and Clinical Outcomes. *J Am Coll Cardiol*. avr 2014;63(16):1657-66.
24. Schuster A, Kutty S, Padiyath A, Parish V, Gribben P, Danford DA, et al. Cardiovascular magnetic resonance myocardial feature tracking detects quantitative wall motion during dobutamine stress. *J Cardiovasc Magn Reson Off J Soc Cardiovasc Magn Reson*. 12 oct 2011;13:58.
25. van Everdingen WM, Zweerink A, Nijveldt R, Salden OAE, Meine M, Maass AH, et al. Comparison of strain imaging techniques in CRT candidates: CMR tagging, CMR feature tracking and speckle tracking echocardiography. *Int J Cardiovasc Imaging*. mars 2018;34(3):443-56.
26. Siegel B, Olivieri L, Gordish-Dressman H, Spurney CF. Myocardial Strain Using Cardiac MR Feature Tracking and Speckle Tracking Echocardiography in Duchenne Muscular Dystrophy Patients. *Pediatr Cardiol*. mars 2018;39(3):478-83.
27. White JA, Yee R, Yuan X, Krahn A, Skanes A, Parker M, et al. Delayed enhancement magnetic resonance imaging predicts response to cardiac resynchronization therapy in

patients with intraventricular dyssynchrony. *J Am Coll Cardiol.* 21 nov 2006;48(10):1953-60.

28. Bleeker GB, Kaandorp TAM, Lamb HJ, Boersma E, Steendijk P, de Roos A, et al. Effect of posterolateral scar tissue on clinical and echocardiographic improvement after cardiac resynchronization therapy. *Circulation.* 21 févr 2006;113(7):969-76.
29. Chalil S, Foley PWX, Muyhaldeen SA, Patel KCR, Yousef ZR, Smith REA, et al. Late gadolinium enhancement-cardiovascular magnetic resonance as a predictor of response to cardiac resynchronization therapy in patients with ischaemic cardiomyopathy. *Eur Eur Pacing Arrhythm Card Electrophysiol J Work Groups Card Pacing Arrhythm Card Cell Electrophysiol Eur Soc Cardiol.* nov 2007;9(11):1031-7.
30. Ypenburg C, Schalij MJ, Bleeker GB, Steendijk P, Boersma E, Dibbets-Schneider P, et al. Impact of viability and scar tissue on response to cardiac resynchronization therapy in ischaemic heart failure patients. *Eur Heart J.* 13 juin 2006;28(1):33-41.
31. Leyva F, Taylor RJ, Foley PWX, Umar F, Mulligan LJ, Patel K, et al. Left ventricular midwall fibrosis as a predictor of mortality and morbidity after cardiac resynchronization therapy in patients with nonischemic cardiomyopathy. *J Am Coll Cardiol.* 23 oct 2012;60(17):1659-67.
32. Leyva F, Zegard A, Acquaye E, Gubran C, Taylor R, Foley PWX, et al. Outcomes of Cardiac Resynchronization Therapy With or Without Defibrillation in Patients With Nonischemic Cardiomyopathy. *J Am Coll Cardiol.* 5 sept 2017;70(10):1216-27.
33. Chen Z, Sohal M, Sammut E, Child N, Jackson T, Claridge S, et al. Focal But Not Diffuse Myocardial Fibrosis Burden Quantification Using Cardiac Magnetic Resonance Imaging Predicts Left Ventricular Reverse Modeling Following Cardiac Resynchronization Therapy. *J Cardiovasc Electrophysiol.* févr 2016;27(2):203-9.

34. Höke U, Khidir MJH, van der Geest RJ, Schalij MJ, Bax JJ, Delgado V, et al. Relation of Myocardial Contrast-Enhanced T1 Mapping by Cardiac Magnetic Resonance to Left Ventricular Reverse Remodeling After Cardiac Resynchronization Therapy in Patients With Nonischemic Cardiomyopathy. *Am J Cardiol.* 01 2017;119(9):1456-62.
35. Chiribiri A, Kelle S, Götze S, Kriatselis C, Thouet T, Tangcharoen T, et al. Visualization of the Cardiac Venous System Using Cardiac Magnetic Resonance. *Am J Cardiol.* févr 2008;101(3):407-12.
36. Givsky MJ, Shinbane JS, Ahmadi N, Mao S, Flores F, Budoff MJ. Prospective randomized trial of venous cardiac computed tomographic angiography for facilitation of cardiac resynchronization therapy. *Pacing Clin Electrophysiol PACE.* oct 2010;33(10):1182-7.
37. Behar JM, Rajani R, Pourmorteza A, Preston R, Razeghi O, Niederer S, et al. Comprehensive use of cardiac computed tomography to guide left ventricular lead placement in cardiac resynchronization therapy. *Heart Rhythm.* sept 2017;14(9):1364-72.
38. Lee H-J, Im DJ, Youn J-C, Chang S, Suh YJ, Hong YJ, et al. Assessment of myocardial delayed enhancement with cardiac computed tomography in cardiomyopathies: a prospective comparison with delayed enhancement cardiac magnetic resonance imaging. *Int J Cardiovasc Imaging.* avr 2017;33(4):577-84.
39. Fauchier L, Marie O, Casset-Senon D, Babuty D, Cosnay P, Fauchier JP. Interventricular and intraventricular dyssynchrony in idiopathic dilated cardiomyopathy: a prognostic study with fourier phase analysis of radionuclide angioscintigraphy. *J Am Coll Cardiol.* 4 déc 2002;40(11):2022-30.

40. Henneman MM, Chen J, Dibbets-Schneider P, Stokkel MP, Bleeker GB, Ypenburg C, et al. Can LV dyssynchrony as assessed with phase analysis on gated myocardial perfusion SPECT predict response to CRT? *J Nucl Med Off Publ Soc Nucl Med.* juill 2007;48(7):1104-11.
41. Boogers MM, Van Krieking SD, Henneman MM, Ypenburg C, Van Bommel RJ, Boersma E, et al. Quantitative Gated SPECT-Derived Phase Analysis on Gated Myocardial Perfusion SPECT Detects Left Ventricular Dyssynchrony and Predicts Response to Cardiac Resynchronization Therapy. *J Nucl Med.* 1 mai 2009;50(5):718-25.
42. Bertini M, Mele D, Malagù M, Fiorencis A, Toselli T, Casadei F, et al. Cardiac resynchronization therapy guided by multimodality cardiac imaging: CRT guided by multimodality imaging. *Eur J Heart Fail.* nov 2016;18(11):1375-82.
43. Shetty AK, Duckett SG, Ginks MR, Ma Y, Sohal M, Bostock J, et al. Cardiac magnetic resonance-derived anatomy, scar, and dyssynchrony fused with fluoroscopy to guide LV lead placement in cardiac resynchronization therapy: a comparison with acute haemodynamic measures and echocardiographic reverse remodelling. *Eur Heart J - Cardiovasc Imaging.* 1 juill 2013;14(7):692-9.
44. Sommer A, Kronborg MB, Nørgaard BL, Poulsen SH, Bouchelouche K, Böttcher M, et al. Multimodality imaging-guided left ventricular lead placement in cardiac resynchronization therapy: a randomized controlled trial: Imaging-guided LV lead placement in CRT. *Eur J Heart Fail.* nov 2016;18(11):1365-74.
45. Thomas G, Kim J, Lerman BB. Improving Cardiac Resynchronisation Therapy. *Arrhythmia Electrophysiol Rev.* juill 2019;8(3):220-7.

46. Cikes M, Sanchez-Martinez S, Claggett B, Duchateau N, Piella G, Butakoff C, et al. Machine learning-based phenogrouping in heart failure to identify responders to cardiac resynchronization therapy. *Eur J Heart Fail.* 2019;21(1):74-85.
47. Feeny AK, Rickard J, Patel D, Toro S, Trulock KM, Park CJ, et al. Machine Learning Prediction of Response to Cardiac Resynchronization Therapy: Improvement Versus Current Guidelines. *Circ Arrhythm Electrophysiol.* 2019;12(7):e007316.
48. Kalscheur MM, Kipp RT, Tattersall MC, Mei C, Buhr KA, DeMets DL, et al. Machine Learning Algorithm Predicts Cardiac Resynchronization Therapy Outcomes: Lessons From the COMPANION Trial. *Circ Arrhythm Electrophysiol.* janv 2018;11(1).

Légendes

Figure 1. Septal flash et apical rocking en ciné IRM SSFP 4 cavités. En protosystole (A), la contraction brève du septum ou « septal flash » (flèche droite) attire vers lui l'apex ventriculaire gauche (flèche courbe). En télésystole (B), l'activation retardée de la paroi latérale (flèche droite) tire latéralement l'apex (flèche courbe) lequel subit ainsi un mouvement de balancier ou « apical rocking ».

Figure 2. Tagging myocardique. Une grille de radiofréquence appliquée en télédiastole (A) réalise un tatouage du myocarde. Les mouvements du myocarde en systole (B) entraînent une déformation de la grille qui peut être quantifiée.

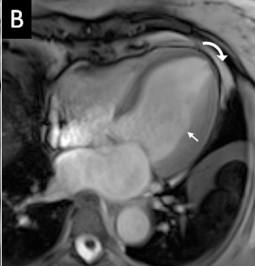
Figure 3. Feature tracking. Images de ciné IRM SSFP 4 cavités (A) à partir desquelles peuvent être extraites (B) des courbes de strain longitudinales (jaune), circonférentielles (rose) ou radiales (bleu). Représentation du strain en cartographie 3D (C) ou bull's eye 17 segments (D).

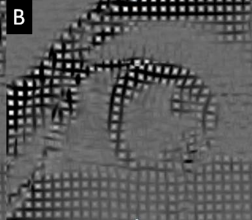
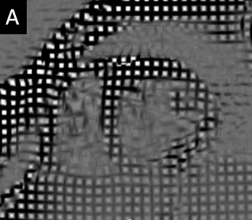
Figure 4. Fibrose myocardique médio-murale (« mid-wall ») chez un homme de 41 ans dans un bilan pré-CRT. Coupes petit axe PSIR (A) et 4 cavités FLASH 3D (B) acquises 10 minutes après injection de gadolinium montrant un rehaussement myocardique septal médio-mural (flèches) correspondant à des lésions de fibrose dans une cardiomyopathie dilatée non ischémique (FEVG=29%, bloc de branche gauche).

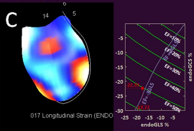
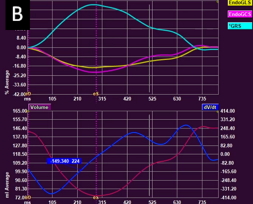
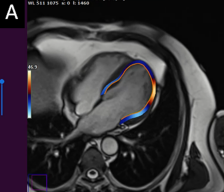
Figure 5. Angioscanner cardiaque veineux chez un patient de 69 ans dans un bilan pré-CRT. Coupes axiales après injection (A-D) montrant le sinus coronaire (flèche noire), la naissance (tête de flèche noire) de la veine postérieure du ventricule gauche (flèche blanche), et la naissance de la veine marginale gauche (flèche blanche pointillée) depuis la grande veine cardiaque (tête de flèche blanche) laquelle correspond au prolongement d'amont du sinus coronaire. Les deux veines préférentiellement ciblées lors des procédures de CRT sont la veine postérieure du ventricule gauche et la veine marginale gauche mais les variantes anatomiques sont fréquentes.

Figure 6. Imagerie multimodale. Modélisation 3D du ventricule gauche (A, B) intégrant les données anatomiques (cavités et réseau veineux coronaire) du scanner, les données de rehaussement tardif de l'IRM et les données de strain échocardiographique. Guidage de la CRT par projection 4D sur l'image fluoroscopique de l'anatomie veineuse ainsi que des données de rehaussement tardif (C) et de strain (D).

Tableau 1. Avantages et inconvénients comparés de l'IRM et de l'échocardiographie pour l'étude de l'asynchronisme mécanique.

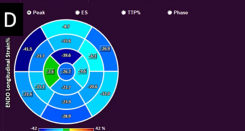


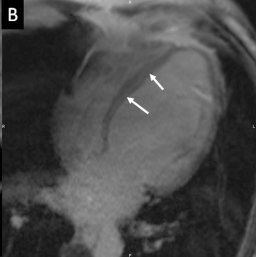
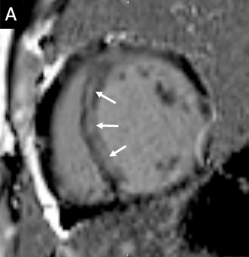


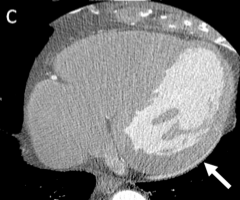
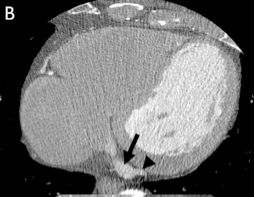
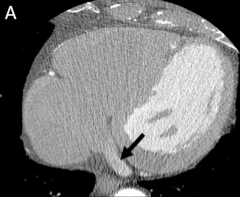


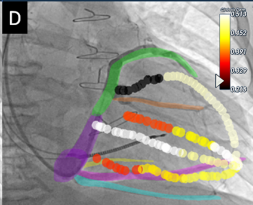
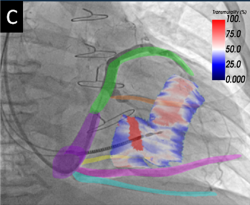
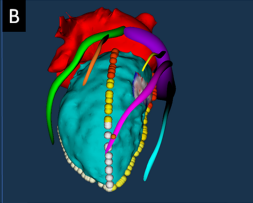
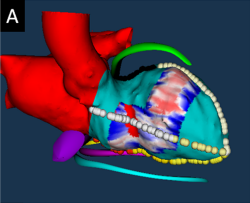
Average

EDV	144.00 ml
ESV	71.85 ml
EF	49.79 %
EndoG15	-12.27 %
EndoG25	-22.13 %
*G25	39.28 %
10-15-Peak	50.9 %









Technique	Avantages	Inconvénients
Echocardiographie	<p>Accès facile</p> <p>Coût moindre</p> <p>Excellente résolution temporelle (jusqu'à 150 images/cycle)</p> <p>Robustesse du strain radial</p> <p>Littérature abondante</p>	<p>Fenêtre acoustique parfois limitante</p> <p>Caractère opérateur-dépendant de l'acquisition des images</p>
IRM	<p>Exploration de tous les segments dans tous les plans sans limite anatomique</p> <p>Feature tracking applicable aux séquences de routine clinique</p> <p>Robustesse du strain circonférentiel</p> <p>Informations additionnelles (technique gold standard pour les mesures de volume et l'évaluation de la cicatrice myocardique)</p>	<p>Résolution temporelle limitée (25-35 images/cycle)</p> <p>Coût élevé</p> <p>Disponibilité moindre</p> <p>Artefacts (apnées non tenues, arythmie, matériel métallique)</p> <p>Expertise peu répandue</p> <p>Performances limitées du strain longitudinal</p>