



Ce logo a pour objet d'alerter le lecteur sur la menace que représente pour l'avenir de l'écrit, tout particulièrement dans le domaine universitaire, le développement massif du «photo-copillage». Cette pratique qui s'est généralisée, notamment dans les établissements d'enseignement, provoque une baisse brutale des achats de livres, au point que la possibilité même pour les auteurs de créer des œuvres nouvelles et de les faire éditer correctement est aujourd'hui menacée.

Nous rappelons donc que la reproduction et la vente sans autorisation, ainsi que le recel, sont passibles de poursuites. Les demandes d'autorisation de photocopier doivent être adressées à l'éditeur ou au Centre français d'exploitation du droit de copie : 20, rue des Grands-Augustins, 75006 Paris. Tél. 01 44 07 47 70.

Tous droits de traduction, d'adaptation et de reproduction par tous procédés, réservés pour tous pays.

Toute reproduction ou représentation intégrale ou partielle, par quelque procédé que ce soit, des pages publiées dans le présent ouvrage, faite sans l'autorisation de l'éditeur est illicite et constitue une contrefaçon. Seules sont autorisées, d'une part, les reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective et, d'autre part, les courtes citations justifiées par le caractère scientifique ou d'information de l'œuvre dans laquelle elles sont incorporées (art. L. 122-4, L. 122-5 et L. 335-2 du Code de la propriété intellectuelle).

L'éditeur ne pourra être tenu pour responsable de tout incident ou accident, tant aux personnes qu'aux biens, qui pourrait résulter soit de sa négligence, soit de l'utilisation de tous produits, méthodes, instructions ou idées décrits dans la publication. En raison de l'évolution rapide de la science médicale, l'éditeur recommande qu'une vérification extérieure intervienne pour les diagnostics et la posologie.

L'édition originale, *Cardiovascular Magnetic Resonance Made Easy* (ISBN 978-0-443-10301-8), a été publiée par Churchill Livingstone, une marque d'Elsevier Limited.

This edition of Cardiovascular Magnetic Resonance Made Easy, by Anitha Varghese and Dudley J Pennel is published by arrangement with Elsevier.

© 2008 Elsevier Limited. All rights reserved.

© 2009 Elsevier Masson SAS. Tous droits réservés pour la traduction française.

Elsevier Masson SAS, 62 rue Camille-Desmoulins, 92442 Issy-les-Moulineaux cedex
www.elsevier-masson.fr

Photocomposition : SPI Publisher Services, Pondichéry, Inde
Imprimé en Italie par LegoPrint, Lavis (Trento), Italie
Dépôt légal : octobre 2009

ISBN : 978-2-8101-0125-2

Remerciements

Nous tenons à remercier tous les médecins et les techniciens du département d'IRM cardiovasculaire du Royal Brompton Hospital.

Nous voulons exprimer une reconnaissance particulière à Laurence Hunter, Helen Leng, Charles Lauder Jr et Elouise Ball d'Elsevier, Ritesh Mewar, Didier Locca, Henning Steen, Taigang He, Paul Kotwinski et Karen Symmonds qui ont largement aidé à la réalisation de cet ouvrage.

■ Note aux lecteurs

On notera que l'ensemble des données exposées dans cet ouvrage sont relatives à des IRM cardiovasculaires réalisées à 1,5 Tesla.

To R and K

— My constant companions

AV

To Indigo Lucy

— May the wonder of nature always fascinate you

DJP

Préface

L'IRM cardiovasculaire correspond aux applications de l'imagerie par résonance magnétique pour l'évaluation anatomique et fonctionnelle du cœur et des gros vaisseaux. En cardiologie, les modalités d'imagerie non invasive reposaient principalement sur l'échocardiographie et les techniques scintigraphiques. L'IRM cardiovasculaire est à la fois concurrente et complémentaire de ces méthodes pour la pathologie cardiovasculaire.

Il existe plusieurs ouvrages de référence consacrés à l'IRM cardiovasculaire, focalisés sur les aspects techniques ou sur les applications cliniques. L'objectif de ce manuel est de proposer dans un format de poche un résumé des connaissances essentielles en matière d'IRM cardiovasculaire. On peut considérer que le Royal Brompton Hospital est l'un des pionniers en matière d'IRM cardiovasculaire, et nous espérons que ce manuel nous permettra de partager avec le lecteur l'expérience acquise au sein de cette institution.

Le cœur de cible de notre ouvrage est dirigé vers les cardiologues et les chirurgiens cardiothoraciques cherchant à se perfectionner en IRM cardiovasculaire et notamment désireux de savoir ce que peut faire l'IRM cardiovasculaire, mais aussi ce qu'elle ne peut pas faire. C'est la raison pour laquelle nous abordons les applications cardiaques de l'IRM puis ses applications vasculaires, et que cet ouvrage débute par un chapitre résumant les principes de formation de l'image.

Anitha Varghese
Dudley Pennell

Contributeurs

Beatriz Bouzas MD

Consultant Cardiologist, Servicio de Cardiología, Complejo Hospitalario Universitario Juan Canalejo, La Caruña, Spain

Ping Chai MRCP

Consultant Cardiologist, Cardiac Department, National University Hospital, Singapore
The Heart Institute, National Healthcare Group, Singapore

Ilse Crevits MD

General Radiologist, HHR—Site Roeselare Hospital, Roeselare
Visiting Consultant CMR, University Hospitals of Leuven, Belgium

George E Gentchos MD

Assistant Professor of Radiology, College of Medicine University of Vermont, Burlington, Vermont, USA

Chad A Hoyt MD FACC

Director of Cardiovascular CT and MR, Stroobants Heart Center, Centra Health
Director of Noninvasive Cardiovascular Services, Bedford Memorial Hospital
Cardiologist, The Cardiovascular Group, Centra Health, Lynchburg, Virginia, USA

Katharina Kiss MD

Department of Cardiology, Hospital of Hietzing, City of Vienna and Cardiovascular Imaging Unit Rudolfinerhaus Vienna, Austria

James C Moon MA MRCP MD

Senior Lecturer in Cardiology, The Heart Hospital, London, UK

Richard Steeds MA MRCP MD

Consultant Cardiologist with Special Interest in Imaging, University Hospital Birmingham NHS Foundation Trust, Birmingham, UK

Marc D Tischler BA MD FACC FAHA FACP

Associate Professor of Medicine, University of Vermont College of Medicine
Director, Cardiac Ultrasound Laboratory, Fletcher Allen Health Care
Director, Clinical Cardiac MR Unit, Fletcher Allen Health Care, Canada

Anitha Varghese BSc MRCP

Research Fellow, Royal Brompton Hospital, London; Specialist Register in Cardiology, West Midlands Deanery, UK

Abréviations

AO	aorte	IRM	imagerie par résonance magnétique
AP	artère pulmonaire	MIP	<i>maximal intensity projection</i>
ARM	angiographie par résonance magnétique	OD	oreillette droite
CIA	communication interauriculaire	OG	oreillette gauche
CIV	communication interventriculaire	SRM	spectroscopie par résonance magnétique
CMD	cardiomyopathie dilatée	SSFP	<i>steady state free precession</i>
CMH	cardiomyopathie hypertrophique	T	Tesla
DAVD	dysplasie arythmogène du ventricule droit	VCI	veine cave inférieure
ECG	électrocardiogramme	VCS	veine cave supérieure
FLASH	<i>fast low angle shot</i>	VD	ventricule droit
Gd-DTPA	<i>gadolinium-diethylenetriamine pentaacetic acid</i>	VG	ventricule gauche
		VRT	<i>volume rendering technique</i>

Principes de l'IRM cardiovasculaire

Anitha Varghese

■ Bases physiques

L'imagerie par résonance magnétique (IRM) est fondée sur le principe de résonance magnétique nucléaire qui repose sur le phénomène de résonance des noyaux atomiques après leur excitation par une onde de radiofréquence.

L'atome d'hydrogène est l'élément le plus simple et le constituant le plus important du corps humain. Il est constitué d'un seul proton autour duquel tourne un seul électron. C'est la raison pour laquelle on peut assimiler le noyau d'hydrogène à un proton. En pratique clinique, les techniques d'IRM se servent de ce proton pour lui transmettre de l'énergie et pour mesurer le signal de radiofréquence réémis par le proton. Les protons ont un axe magnétique orienté de façon aléatoire en l'absence de stimulation extérieure. Lorsque l'on applique un champ magnétique principal, les protons s'alignent selon la direction de ce champ magnétique principal et ont un mouvement de rotation autour de l'axe du champ magnétique principal. Ce mouvement de rotation est appelé «précession». Les caractéristiques de ce mouvement de précession sont mesurées par la fréquence de précession qui est corrélée de façon linéaire à l'intensité du champ magnétique principal. Lorsque les protons précessent de façon synchrone, on dit qu'ils sont «en phase». Ce mouvement d'ensemble synchrone disparaît avec le temps, on dit alors que les protons sont «déphasés».

En présence d'un champ magnétique principal, les protons s'alignent dans la direction du champ magnétique principal et il existe une aimantation longitudinale résultante non nulle. Ce mouvement d'équilibre peut être perturbé par des impulsions de radiofréquence à la fréquence de précession qui est de 63 mégahertz (MHz) pour les protons de l'eau à 1,5 Tesla (T), qui constitue l'intensité du champ magnétique caractérisant la plupart des systèmes d'IRM utilisés en pratique clinique ([figure 1.1](#)).

Le degré de stimulation des protons est directement proportionnel à l'amplitude et à la durée de l'impulsion de radiofréquence. À la fin de l'impulsion, les protons reviennent à leur état d'équilibre : c'est la relaxation, accompagnée d'une émission d'énergie définie par deux paramètres, le paramètre de relaxation longitudinale T1 et le paramètre de relaxation transversale T2. Le temps de relaxation longitudinale T1 mesure le temps de retour à l'aimantation longitudinale d'équilibre. L'aimantation

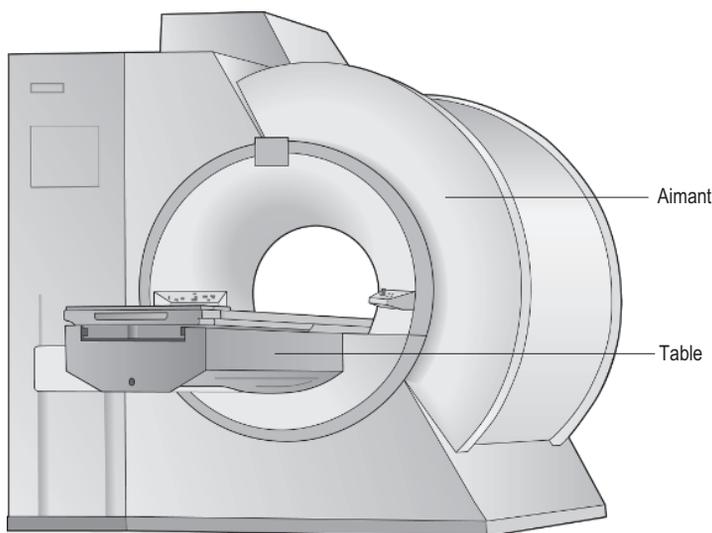


Figure 1.1 Système d'IRM à 1,5 Tesla. La table d'examen sur laquelle le patient est installé est montrée au sein de l'aimant supraconducteur.

transversale décroît selon un paramètre mesuré par le T2. Cette relaxation transversale se fait beaucoup plus rapidement que la relaxation longitudinale. Les temps de relaxation T1 et T2 sont des caractéristiques de l'environnement de l'atome d'hydrogène en fonction des différents tissus ; on peut utiliser différentes séquences d'imagerie privilégiant l'un ou l'autre de ces paramètres. On parle de séquences pondérées en T1 et de séquences pondérées en T2. Les valeurs du T2 sont constamment inférieures aux valeurs de T1 et par définition, T1 représente la limite supérieure du T2. Les valeurs de T1 et de T2 évoluent de façon parallèle chaque fois que le mouvement du proton est relativement désordonné, par exemple dans le tissu adipeux qui a un T1 et un T2 courts et dans l'eau libre qui a un T1 et un T2 longs. Les tissus ayant une structure plus organisée contiennent de l'eau liée en abondance. Dans ces tissus, les mouvements des protons sont beaucoup plus ordonnés. Dès lors, la relaxation transversale se fait beaucoup plus vite du fait des échanges d'énergie entre les protons et les valeurs de T2 sont beaucoup plus courtes que les valeurs de T1.

La localisation anatomique des différentes coupes au sein d'un volume est réalisée par l'application de gradient d'encodage en fréquence et en phase. Les directions d'application de ces deux gradients différents sont connues comme les directions de codage de phase et de codage de fréquence. Du fait des modifications de phase observées au sein du sang circulant, il est possible de différencier le sang circulant des tissus stationnaires en analysant ces modifications de phase. Les modifications de phase sont proportionnelles à la vitesse circulatoire du fait de l'application d'un gradient de codage de phase.

L'émission et la réception des ondes de radiofréquence sont réalisées à l'aide d'antennes. Les données brutes obtenues sont ultérieurement converties en images, en se servant d'ordinateurs très puissants qui utilisent un outil mathématique : la transformée de Fourier.

■ Séquences principales

On utilise principalement deux types de séquences en IRM cardiovasculaire. Les séquences d'écho de gradient et les séquences d'écho de spin. D'une manière générale, le sang et la graisse sont à l'origine d'un signal intense et apparaissent en blanc sur les séquences en écho de gradient. On parle également de séquences « sang blanc » (figure 1.2a). Au contraire, sur les séquences d'écho de spin, le sang est généralement représenté en noir alors que la graisse est blanche ; on parle de séquences « sang noir » (figure 1.2b).

Les séquences d'écho de spin sont généralement des séquences dites « anatomiques », par opposition aux images fonctionnelles obtenues avec les séquences d'écho de gradient.

Il existe de multiples séquences en écho de gradient, telles que les séquences FLASH (*fast low angle shot*), les séquences SSFP (*fast imaging with steady state free precession*) et les séquences de cartographie des vitesses.

Il est également possible en écho de gradient de réaliser des séquences en inversion-récupération.

Les zones de dysfonction myocardique et les flux anormaux sont facilement repérés en IRM cardiovasculaire en se servant des techniques de ciné-IRM. Les coupes en mode ciné-IRM sont obtenues par des répétitions rapides de séquences d'écho de gradient afin d'obtenir des images à chacun des différents temps du cycle cardiaque. Ces images peuvent ensuite être analysées en boucle.

La pondération des séquences SSFP utilisées en ciné-IRM dépend du rapport T2/T1. C'est pourquoi la majorité des liquides et la graisse ont un signal élevé et apparaissent en blanc. Au contraire, le muscle et d'autres organes pleins ont un T1 long et un T2 court. C'est la raison pour laquelle leur signal paraît gris (figure 1.2a). En plus des séquences ciné-IRM, les séquences SSFP peuvent être exploitées en mode *single shot* bidimensionnel (2D) avec une acquisition en temps réel (ne nécessitant ni apnée, ni synchronisation cardiaque) ou en mode tridimensionnel (3D).

Les techniques de cartographie des vitesses ou cartographie des vitesses circulatoires sont aptes à analyser la vitesse moyenne au sein d'un voxel (généralement $1 \times 1 \times 10 \text{ mm}^3$). L'opérateur sélectionne le plan d'analyse et détermine une vitesse maximale d'encodage (V_{enc}) [figure 1.3].

La vitesse d'encodage maximale utilisée initialement est déterminée de façon approximative en se servant de facteurs tels que l'histoire clinique, les caractéristiques de la valve ou du vaisseau étudié et les images préalablement obtenues.

La vitesse d'encodage maximale constitue en pratique le seuil de vitesse maximale pour lequel les vitesses peuvent être analysées de façon correcte. La valeur optimale de cette vitesse d'encodage maximale est située juste au-dessus de la vitesse maximale. Des problèmes techniques sont observés si la vitesse d'encodage maximale est

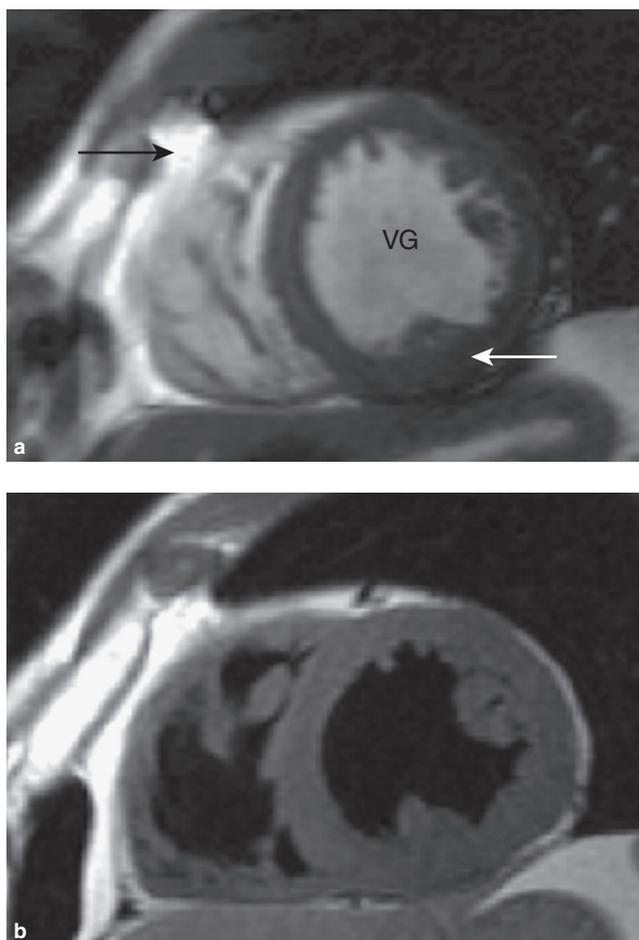


Figure 1.2 **a.** Coupe petit axe médioventriculaire en écho de gradient. Le sang au sein du ventricule gauche (VG) est blanc comme la graisse épicaudique (flèche noire). Le myocarde ventriculaire gauche (flèche blanche) est gris. **b.** Coupe en écho de spin. Le sang au sein du ventricule gauche est noir alors que la graisse reste blanche.

fixée beaucoup plus haut ou plus bas que la vitesse maximale réelle. Dans le premier cas, la sensibilité de la méthode est diminuée; dans le second cas, des phénomènes artéfactuels sont observés, connus sous le nom d'« aliasing » ou repliement. En matière de vitesse, l'aliasing ou repliement se traduit par une représentation de la direction du flux à l'inverse de la direction normale et est visualisé sous la forme d'une inversion brutale blanc/noir, ou l'inverse, au sein de la région étudiée (figure 1.3d). Pour éliminer ou réduire les artéfacts d'aliasing, il faut recommencer la séquence en utilisant une vitesse d'encodage supérieure (figure 1.3e). La mesure des vitesses circulatoires ne peut être effectuée qu'à condition que la vitesse d'encodage maximale ait été préalablement correctement déterminée.

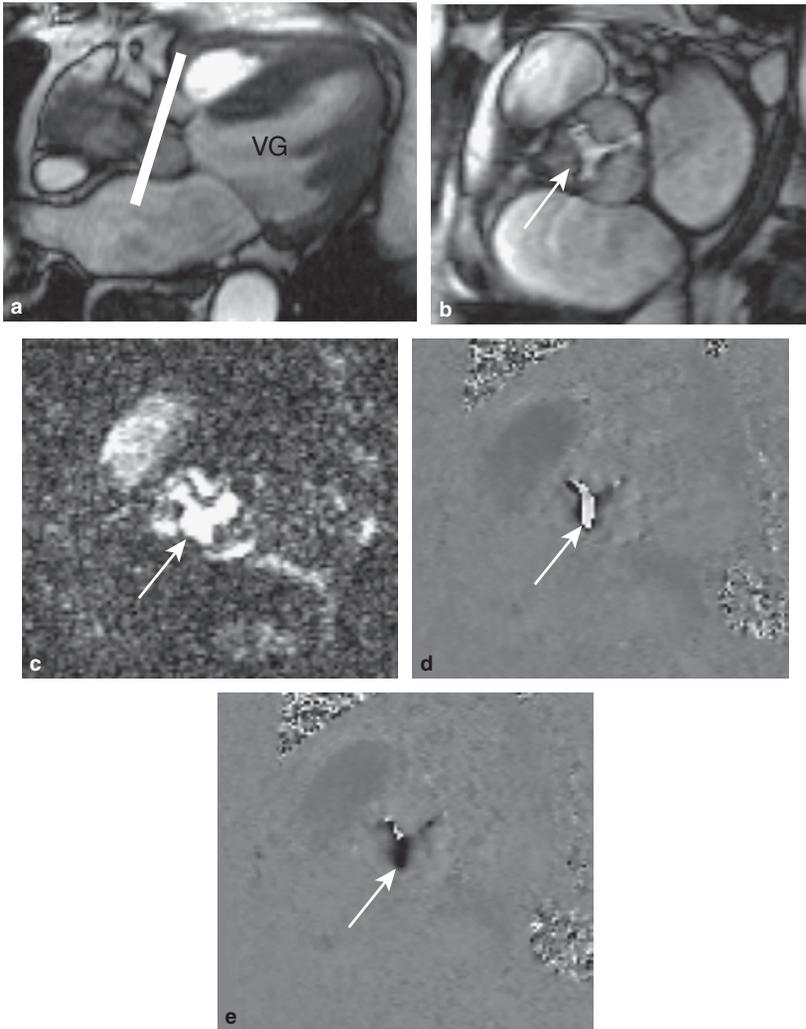


Figure 1.3 Images de ciné-IRM (**a,b**) et de cartographie des vitesses (**c-e**).

a. Image ciné-IRM de la chambre de chasse du ventricule gauche lors d'un rétrécissement aortique serré. On détermine le plan d'analyse pour l'étude des vitesses, en choisissant un plan perpendiculaire à l'orifice valvulaire juste au-dessus des sigmoïdes (ligne blanche). Le plan de coupe oblique obtenu est montré en (b). **b.** L'orifice aortique tricuspide est visualisé (flèche blanche). C'est dans ce plan qu'est réalisée la cartographie des vitesses. La surface d'ouverture des sigmoïdes peut également être mesurée dans ce plan. **c.** L'image de magnitude de la séquence de cartographie des vitesses confirme la réduction d'ouverture des valves tricuspides (flèche). **d.** La séquence de cartographie des vitesses représente le flux d'éjection systolique, à travers les sigmoïdes en noir et la vitesse d'encodage maximale ayant été programmée trop bas, le centre du jet apparaît en blanc du fait de l'artéfact d'aliasing (flèche blanche). **e.** Une seconde séquence de cartographie des vitesses a été ensuite réalisée en utilisant une vitesse d'encodage maximale plus élevée. Le jet apparaît maintenant en noir (flèche blanche) et le phénomène d'aliasing n'est plus observé qu'au sein de quelques pixels. La mesure de vitesse maximale au centre de la zone de sténose était de 4 m/sec.

Le phénomène d'*aliasing* est également observé en échocardiographie doppler et pose les mêmes problèmes. Au moment de la mesure, on demande au patient de tenir une apnée d'environ 20s. Un des exemples d'utilisation des séquences de cartographie des vitesses est la mesure de la vitesse maximale au sein d'une sténose valvulaire. Des séquences de cartographie des vitesses peuvent également être utilisées pour calculer la vitesse circulatoire moyenne au sein d'un gros vaisseau au cours du cycle cardiaque, ou pour quantifier la fraction de régurgitation en cas d'insuffisance valvulaire. Pour le calcul d'une vitesse maximale ou d'un flux transvalvulaire, il faut programmer une séquence *through plane* (à travers le plan) en programmant un plan d'acquisition perpendiculaire juste au-delà de la zone d'intérêt. La technique de cartographie des vitesses est également utilisée pour confirmer des communications interauriculaire ou interventriculaire et pour évaluer ces shunts par le rapport du flux pulmonaire au flux systémique.

Les séquences d'écho de spin sont généralement moins sensibles aux artéfacts que les séquences d'écho de gradient, particulièrement en cas d'hétérogénéité du champ magnétique. En écho de spin, les structures doivent être immobiles pour être à l'origine d'un signal. Le T2 des liquides stationnaires est long et donc le signal des liquides stationnaires est élevé. C'est la raison pour laquelle les structures kystiques qui contiennent un liquide stationnaire immobile sont à l'origine d'un signal intense sur les séquences d'écho de spin. En revanche, le sang circulant se déplace entre la première et la seconde impulsion qui caractérisent les séquences en écho de spin et est à l'origine d'un signal nul, il apparaît donc en noir (figure 1.2b). En cas de flux lent, le sang peut être à l'origine d'un signal intermédiaire. Plus récemment, ont été introduites des séquences d'écho de spin rapide ou *turbo spin echo*. Ces séquences d'écho de spin rapide permettent une acquisition beaucoup plus rapide que les séquences d'écho de spin traditionnelles par l'acquisition de plusieurs lignes du plan de Fourier lors de chaque impulsion de radiofréquence.

Les techniques d'inversion-récupération utilisent une impulsion préparatoire afin d'obtenir un contraste T1 de très bonne qualité, ce qui est particulièrement important pour l'imagerie des zones d'ischémie.

Ce type de séquences ainsi que les séquences d'angiographie par résonance magnétique (ARM) nécessitent l'utilisation d'un produit de contraste. Les produits de contraste IRM utilisant les chélates de gadolinium sont des produits de contraste paramagnétiques, tels par exemple que le *gadolinium-diethylenetriamine pentaacetic acid* (Gd-DTPA). Tous les produits de contraste utilisant des chélates de gadolinium ont une pharmacocinétique de type extravasculaire, ils diffusent donc au sein de l'interstitium après leur injection intraveineuse. L'IRM cardiovasculaire est donc utilisée en se servant de ces différentes séquences afin d'analyser la physiologie cardiovasculaire et l'anatomie cardiovasculaire afin de caractériser les différents tissus. Il est enfin possible d'analyser le métabolisme cardiaque avec les séquences de spectroscopie par résonance magnétique (SRM), mais ce dernier sujet dépasse les objectifs du présent ouvrage.

La majorité des séquences d'IRM cardiovasculaire sont synchronisées à l'électrocardiogramme (ECG) afin de supprimer les artéfacts de mouvement en rapport avec

les battements cardiaques. De plus, les séquences sont généralement réalisées en apnée afin d'éliminer les artefacts de mouvement liés aux mouvements respiratoires.

Il est également possible de synchroniser l'acquisition du signal aux mouvements respiratoires, on parle alors de synchronisation respiratoire, ce qui permet d'obtenir des images en respiration libre. Enfin, il est possible de supprimer le signal élevé originaire de la graisse en se servant d'impulsions de présaturation sélectivement appliquées dans les fréquences de résonance du tissu graisseux. On parle de suppression de la graisse ou de *fat sat*.

Il faut prévenir les patients du caractère très bruyant des systèmes d'IRM. Ce bruit est provoqué par les mouvements des antennes pendant l'application des échos de gradient. On donne généralement aux patients des casques qui permettent de diminuer ces sensations sonores désagréables, tout en facilitant la transmission des instructions données par le technicien de radiologie. Ces casques peuvent également être utilisés pour diffuser de la musique.

■ Système d'imagerie et logiciel

Le système d'imagerie comporte un aimant supraconducteur, un générateur de radiofréquence et un système informatique puissant. On utilise également des systèmes de monitoring physiologique, des seringues électriques pour injection d'adénosine et de dobutamine et des injecteurs pour l'injection de produit de contraste. L'IRM cardiovasculaire est réalisée dans un environnement permettant une éventuelle réanimation. Comme on l'a dit plus haut, on se sert également d'un système de casque permettant possiblement la diffusion d'une ambiance musicale. Des bouchons auriculaires sont fournis aux accompagnateurs de certains patients, tels que les enfants, ou les patients un peu claustrophobes. La claustrophobie ne constitue une contre-indication en IRM que chez 2 % de la population adulte. Ces sensations de claustrophobie peuvent être diminuées par des anxiolytiques à petite dose ou par des systèmes de miroirs réfléchissants permettant au patient, bien qu'à l'intérieur de l'aimant, de voir l'extérieur.

Les systèmes d'imagerie les plus récents ont des séquences particulières en temps réel permettant l'analyse des artères coronaires. Il existe de plus des logiciels de post-traitement pour l'analyse ultérieure des images disponibles chez la majorité des fabricants d'IRM, tels que Siemens, Philips et General Electric.

■ Plans de coupe et protocoles

En imagerie cardiovasculaire, on peut obtenir des images dans tous les plans de l'espace. Les images sont généralement obtenues dans des plans déterminés afin de standardiser les acquisitions. Les patients sont généralement allongés sur le dos et les plans de coupe les plus utilisés en imagerie cardiaque sont les plans quatre cavités, deux cavités, petit axe, chambre de chasse du ventricule gauche et chambre de chasse du ventricule droit.

Les différentes étapes utilisées afin d'obtenir des images dans ces plans de coupe sont montrées dans les figures 1.4 à 1.9 et un plan d'interprétation standard est proposé dans le tableau 1.1.

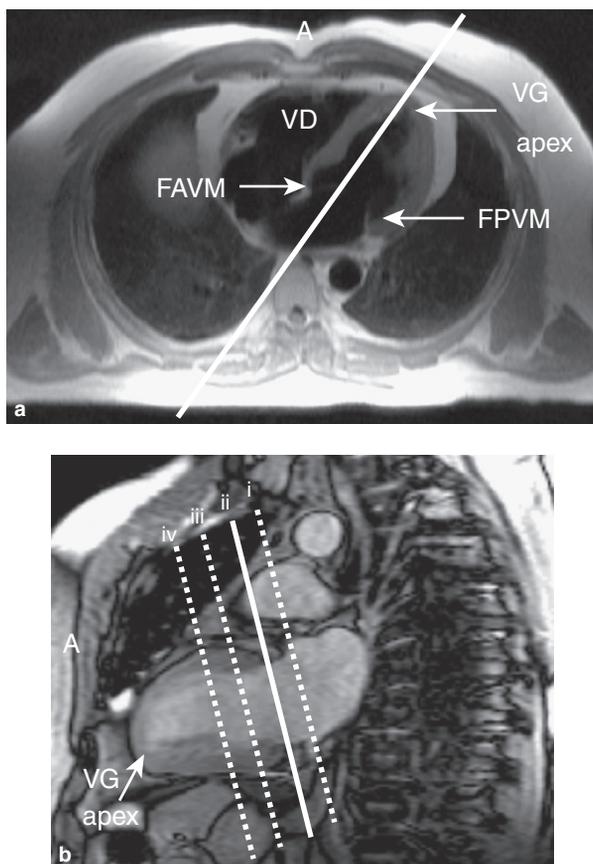


Figure 1.4 a. À partir d'une séquence de repérage en respiration libre en écho de spin rapide, on programme un plan de coupe deux cavités par la réalisation d'un plan parallèle à la ligne reliant la partie moyenne de la valve mitrale et l'apex du ventricule gauche (ligne blanche continue). **b.** En se servant de cette coupe deux cavités, on programme l'acquisition de quatre coupes petit axe perpendiculaires à la jonction auriculoventriculaire (coupe **ii** : ligne blanche continue) et trois autres plans auriculaires et ventriculaires (coupes **i**, **iii** et **iv** : lignes blanches discontinues).
 A : avant; VG : ventricule gauche; VD : ventricule droit; FAVM : feuillet antérieur de la valve mitrale; FPVM : feuillet postérieur de la valve mitrale.

En imagerie cardiaque, le protocole comporte quatre étapes :

- première étape : coupes de localisation ultrarapides dans les trois plans de l'espace : transversal, coronal et sagittal;
- deuxième étape : coupes en basse résolution permettant de couvrir l'ensemble du volume thoracique en deux ou trois plans orthogonaux : plan transversal obligatoire, fréquemment plan coronal, éventuellement plan sagittal (qui devient obligatoire pour l'imagerie aortique);

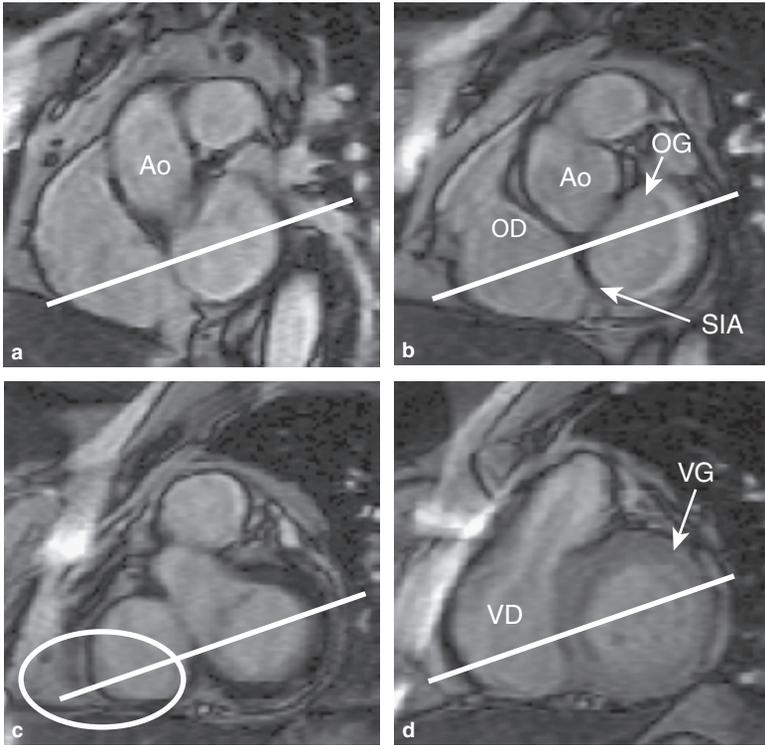


Figure 1.5 On programme l'acquisition de coupes quatre cavités à partir des résultats de ces coupes petit axe (**a-d**). Le plan de coupe (ligne blanche continue) est positionné au centre de la cavité ventriculaire gauche en passant par l'extrémité antérieure du ventricule droit (image **c** : ellipse blanche) et par le septum interauriculaire juste en dessous de l'aorte. AO : aorte ; OD : oreillette droite ; OG : oreillette gauche ; SIA : septum interauriculaire ; VG : ventricule gauche ; VD : ventricule droit.

- *troisième étape* : imagerie cardiaque spécifique dans des plans de coupe standardisés en se servant d'imagerie ciné-IRM, éventuellement complétée par des séquences en écho de spin sang noir ;
- *quatrième étape* : séquences d'imagerie cardiovasculaire sélectionnées en fonction de l'indication clinique, en se servant de plans plus spécifiques ou de séquences plus spécifiques, telles que les séquences d'inversion-récupération.

Les séquences de repérage initiales sont acquises en apnée et sont utilisées pour optimiser le positionnement du patient au sein de l'aimant en repositionnant éventuellement la table d'examen afin que le centre du cœur soit situé au centre de l'aimant. Ces coupes de repérage permettent également de vérifier que les antennes sont correctement activées. Les images suivantes acquises en basse résolution, en se servant de séquences d'écho de spin rapide, permettent d'obtenir rapidement une vue d'ensemble de l'anatomie cardiaque et de l'ensemble du thorax. Ensuite, dans

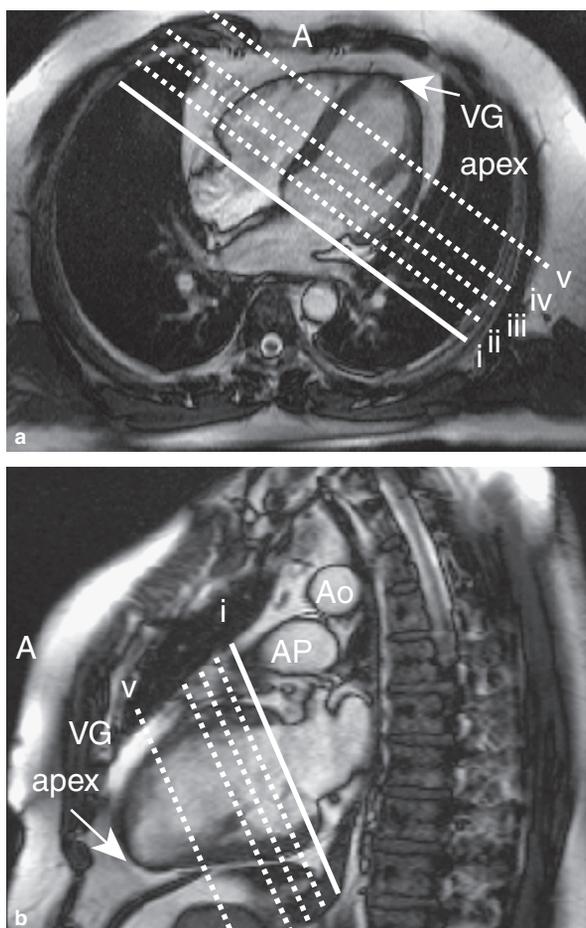


Figure 1.6 Pour obtenir une coupe deux cavités, on se sert de la séquence quatre cavités (a) et de la séquence de repérage deux cavités (b). À partir des images télédiastoliques obtenues en quatre cavités et en deux cavités, on programme les séquences petit axe. Le plan de coupe petit axe (ligne blanche continue) est positionné à la jonction auriculoventriculaire, à l'arrière des ventricules droit et gauche, et les séquences ultérieures (lignes blanches discontinues) sont programmées à partir de ce plan de coupe initial en se dirigeant vers l'apex du ventricule gauche.
 VG : ventricule gauche ; AP : artère pulmonaire ; AO : aorte.

le plan transversal, on programme généralement 35 à 40 coupes acquises en respiration libre en 1 à 2 min. Les séries coronales et sagittales en écho de spin rapide permettent de couvrir le cœur à l'aide de 12 à 15 coupes et peuvent être programmées en apnée. Les séquences en apnée permettent de positionner de façon plus précise les coupes ultérieures et les variations respiratoires sont peu marquées dans le plan transversal. La programmation des différents plans de coupe est détaillée

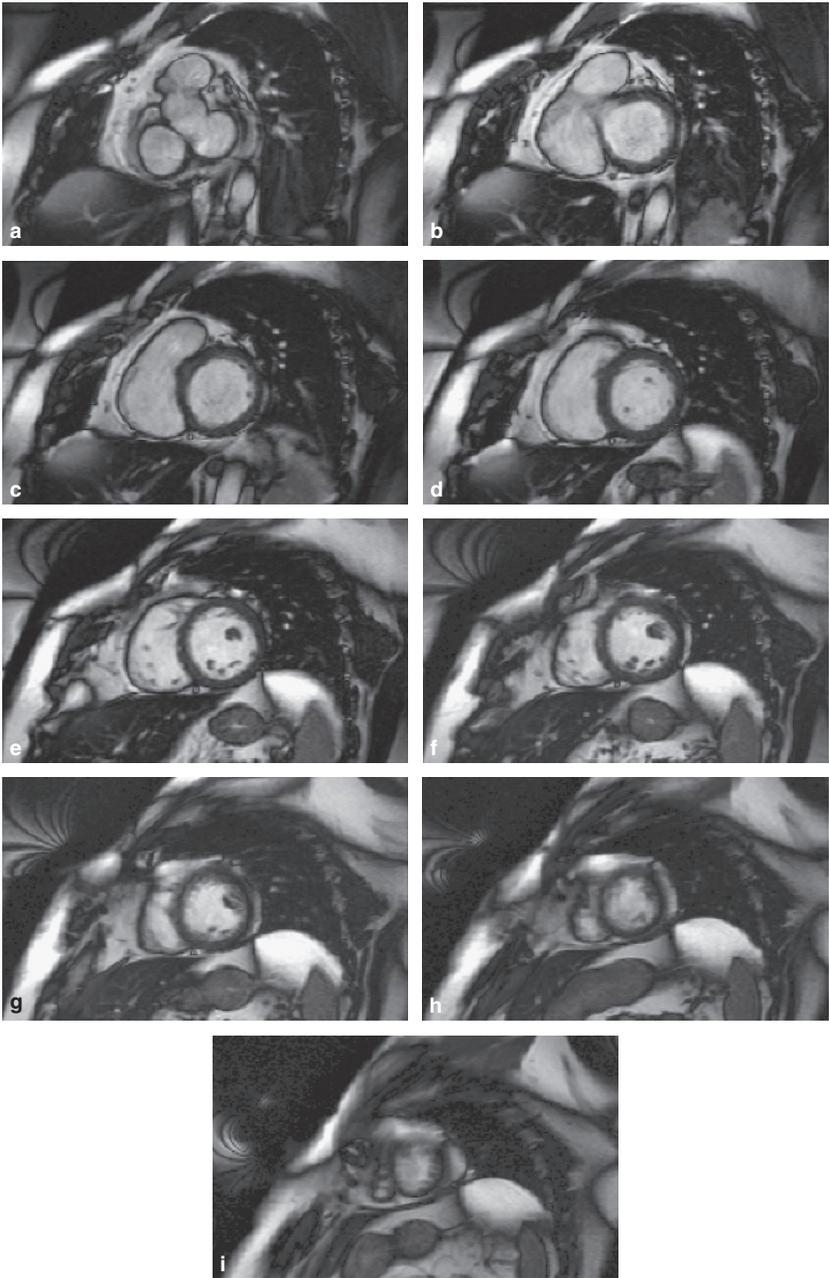


Figure 1.7 Neuf coupes petit axe en mode ciné-IRM (épaisseur de coupe 7 mm, espacement entre les coupes 3 mm). Les neuf coupes permettent généralement de couvrir l'ensemble des ventricules (a-i).

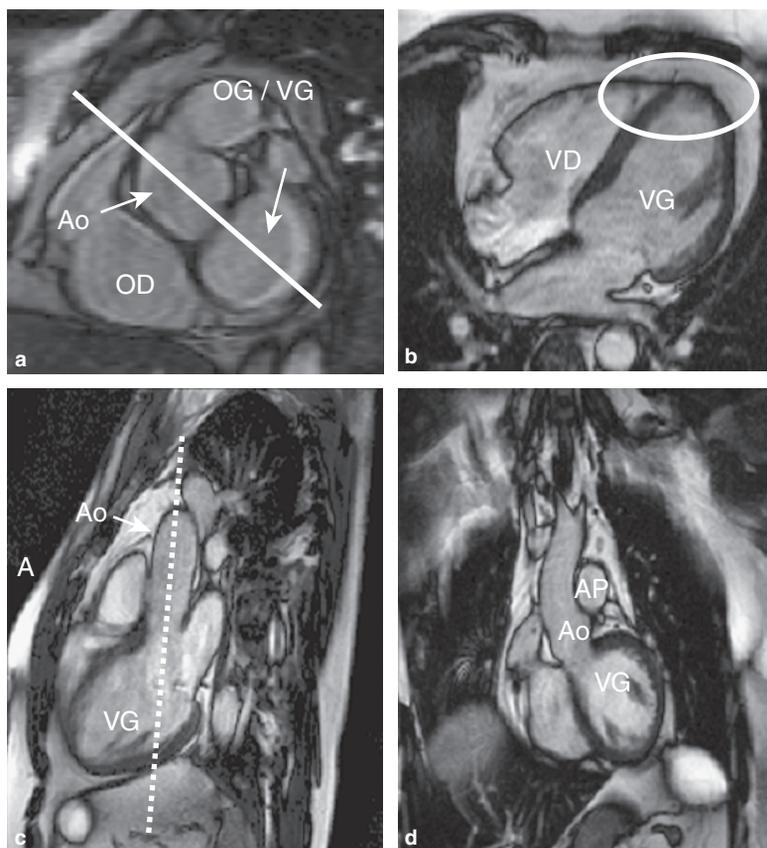


Figure 1.8 Le plan de coupe « chambre de chasse du ventricule gauche » ou LVOT est programmé en se servant de la coupe petit axe de repérage (a) et de la coupe quatre cavités (b). On positionne une coupe perpendiculaire dans le plan de la séquence petit axe de repérage qui coupe la racine de l'aorte et la cavité oreillette gauche distale/ventricule gauche basal (ligne blanche continue). Cette coupe est ensuite angulée afin de passer au sein de l'apex du ventricule gauche (ellipse blanche : coupe b) permettant ainsi d'obtenir la première coupe chambre de chasse du ventricule gauche (image c). Un second plan de coupe passant à travers l'aorte (ligne blanche discontinue) est à l'origine du second plan de coupe chambre de chasse du ventricule gauche dans le plan frontal (d). AP : artère pulmonaire ; VG : ventricule gauche ; VD : ventricule droit ; OG : oreillette gauche ; OD : oreillette droite ; AO : aorte ; AP : artère pulmonaire.

des figures 1.4 à 1.9. On peut encore réaliser d'autres plans en fonction de la pathologie étudiée.

■ Valeurs normales

Les valeurs normales des volumes télédiastoliques, des volumes télésystoliques, des fractions d'éjection et des volumes d'éjection et de la masse myocardique indexés

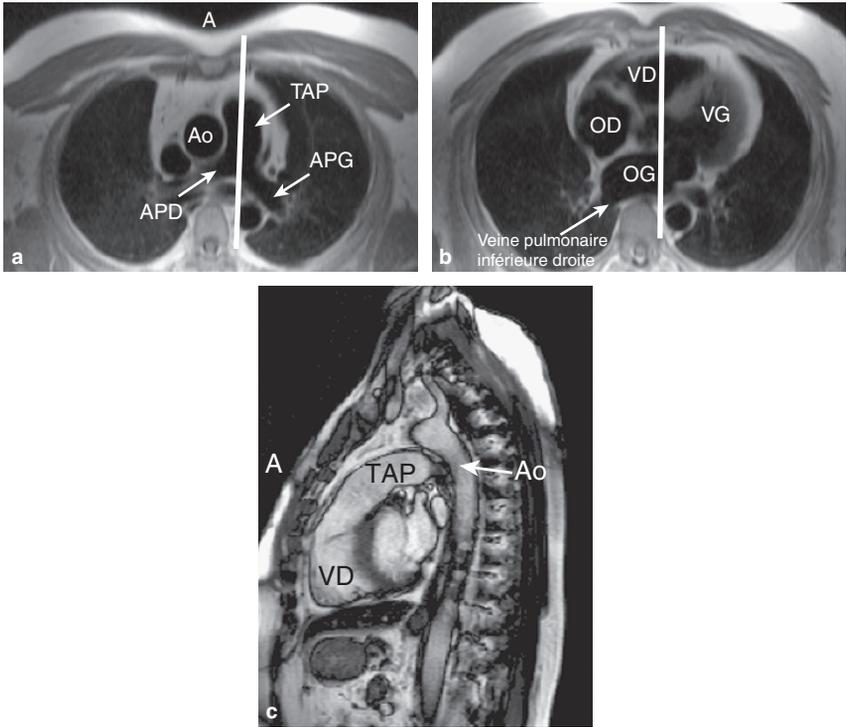


Figure 1.9 Pour la chambre de chasse du ventricule droit, on se repère sur une coupe transversale. On positionne une coupe perpendiculaire au tronc de l'artère pulmonaire qui coupe le ventricule droit (a-b : ligne blanche continue). c. Plan de coupe résultant passant par la chambre de chasse du ventricule droit.

AO : aorte ; APD : artère pulmonaire droite ; APG : artère pulmonaire gauche ; TAP : tronc de l'artère pulmonaire ; VD : ventricule droit ; VG : ventricule gauche ; OD : oreillette droite ; OG : oreillette gauche.

pour l'homme et la femme sont présentées au [tableau 1.2](#). Ces valeurs peuvent être obtenues en utilisant des logiciels semi-automatiques, à partir des coupes petit axe réalisées en écho de gradient. Le calcul des paramètres ventriculaires gauches est généralement obtenu en moins de 5 min, alors que le calcul des caractéristiques ventriculaires droites est plus long du fait de l'anatomie plus complexe du ventricule droit. La quantification des paramètres ventriculaires gauches est obligatoire pour toute IRM cardiovasculaire. Au contraire, on ne calcule les paramètres ventriculaires droites que dans des indications spécifiques telles que les cardiopathies congénitales, les suspicions de dysplasie arythmogène du ventricule droit (DAVD), les cardiomyopathies dilatées et les régurgitations valvulaires. Les valeurs normales doivent être indexées à l'âge et à la surface corporelle.

Les autres données normales sont généralement issues des données échocardiographiques, puisque les valeurs ne sont pas encore standardisées en IRM cardiovasculaire ([tableau 1.3](#)).

Tableau 1.1 Protocole d'acquisition standard acquis en environ 30 min

Avant injection de produit de contraste

Cinq coupes de repérage SSFP
 Coupes transversales en écho de spin rapide basse résolution, respiration libre
 Coupes en écho de spin rapide basse résolution en apnée, coronales ± sagittales
 Deux cavités de repérage
 Petit axe de repérage
 Ciné-IRM quatre cavités et deux cavités
 Ciné-IRM chambre de chasse du ventricule gauche et chambre de chasse du ventricule droit
 Ciné-IRM petit axe

Après injection de produit de contraste

Acquisition précoce après injection (1 à 5 min) :
 (a) quatre cavités
 (b) deux cavités
 (c) chambre de chasse du ventricule gauche
 Séquences tardives après injection (5 à 15 min) :
 (a) quatre cavités
 (b) deux cavités
 (c) petit axe

Tableau 1.2 Valeurs normales des volumes télédiastoliques, téléstistoliques, de la fraction d'éjection et de la masse myocardique

	Volume télédiastolique (ml)	Volume téléstistolique (ml)	Volume d'éjection (ml)	Fraction d'éjection (%)	Masse indexée (g/m²)
Hommes					
Ventricule gauche	77–195	19–72	51–133	56–78	< 113
Ventricule droit	88–227	23–103	52–138	47–74	< 36
Femmes					
Ventricule gauche	52–141	13–51	33–97	56–87	< 95
Ventricule droit	58–154	12–68	35–98	47–80	< 33

■ Indications

La Société Européenne de Cardiologie a publié des recommandations en novembre 2004 concernant les indications de l'IRM cardiovasculaire en fonction de son intérêt pour les différentes pathologies :

- *classe 1* : information de qualité, indication justifiée, l'IRM peut être utilisée en première intention. Le niveau de preuve est appuyé par d'importantes données de la littérature ;

Tableau 1.3 Valeurs normales dérivées de l'échocardiographie

Structure anatomique	Valeurs (cm)
Dimensions aortiques (télédiastoliques)	
Anneau aortique	1,4–2,6
Sinus de Valsalva	2,1–3,5
Jonction sinotubulaire	1,7–3,4
Aorte ascendante (au niveau de la bifurcation de l'artère pulmonaire)	2,1–3,4
Crosse de l'aorte	2,0–3,6
Aorte thoracique descendante (au niveau de la bifurcation de l'artère pulmonaire)	1,4–3,0
Aorte thoracique descendante distale	1,3–2,8
Chambre de chasse du ventricule gauche (diastole)	1,4–2,6
Chambre de chasse du ventricule droit (diastole)	1,8–3,4
Dimensions de l'artère pulmonaire (télédiastoliques)	
Anneau pulmonaire	1,0–2,2
Tronc de l'artère pulmonaire	0,9–2,9
Artère pulmonaire droite	0,7–1,7
Artère pulmonaire gauche	0,6–1,4
Dimensions veineuses	
Pulmonaires	0,7–1,6
Veine cave inférieure	1,2–2,3
Veine cave supérieure	0,8–2,0
Veine hépatique	0,5–1,1

- *classe 2* : information appropriée et fréquemment utilisée, mais d'autres techniques peuvent être à l'origine d'informations similaires. Le niveau de preuve repose sur des données plus limitées de la littérature;
- *classe 3* : peut être à l'origine d'informations cliniques d'intérêt mais est rarement utilisée parce que les résultats d'autres techniques d'imagerie sont généralement suffisants;
- *classe éval.* : potentiellement utile, mais en cours d'évaluation.

L'imagerie cardiovasculaire tient également un rôle important dans le cadre de la recherche et du développement; elle est notamment utilisée par l'industrie pharmaceutique au cours d'essais précliniques.

Les [tableaux 1.4](#), [1.5](#) et [1.6](#) sont reproduits avec l'aimable permission de la Société Européenne de Cardiologie. Tableaux dérivés de Pennell et al. *Clinical Indications for Cardiovascular Magnetic Resonance (CMR) : Consensus Panel Report*, European Heart Journal 2004; 25 (21) : 1940-65.

Tableau 1.4 Indications de l'IRM cardiovasculaire pour les lésions ischémiques

Indication	Classe
1. Analyse de la fonction ventriculaire globale (droite et gauche) et de la masse	I
2. Détection des lésions ischémiques	
Analyse de la fonction ventriculaire gauche régionale au repos et après stress	II
Analyse de la perfusion myocardique	II
Angiographie par résonance magnétique coronaire (cardiopathie ischémique)	III
Angiographie par résonance magnétique coronaire (anomalie anatomique)	I
Angiographie par résonance magnétique coronaire pour analyse des pontages	II
Vitesse circulatoire et flux au sein des artères coronaires	Éval.
Imagerie de la paroi	Éval.
3. Infarctus du myocarde aux stades aigu et chronique	
Diagnostic et analyse	I
Viabilité myocardique	I
Défaut du septum ventriculaire	III
Régurgitation mitrale (infarctus du myocarde aigu)	III
Thrombus ventriculaire	II
Syndromes coronaires aigus	Éval.

Tableau 1.5 Indications de l'IRM cardiovasculaire pour les affections péricardiques, les tumeurs cardiaques, les cardiomyopathies et après transplantation cardiaque

Indication	Classe
1. Épanchement péricardique	III
2. Péricardite constrictive	II
3. Détection et caractérisation des masses cardiaques et péricardiques	I
4. Thrombus ventriculaire	II
5. Cardiomyopathie hypertrophique	
Apicale	I
Non apicale	II
6. Cardiomyopathie dilatée	Éval.
Différenciation des dysfonctions d'origine ischémique	I
7. Dysplasie arythmogène du ventricule droit	I
8. Cardiomyopathie restrictive	II
9. Cardiomyopathie par surcharge en fer (notamment thalassémie)	I
10. Non-compaction	II
11. Rejet post-transplantation cardiaque	Éval.

Tableau 1.6 Indications de l'IRM cardiovasculaire pour les valvulopathies

Indication	Classe
1. Morphologie valvulaire	
Valve auriculoventriculaire	II
Autres valves	III
Végétations	Éval.
2. Anatomie des cavités cardiaques et fonction	I
3. Quantification de la régurgitation	I
4. Quantification de la sténose	III
5. Détection des abcès paravalvulaires	Éval.
6. Évaluation des valves prothétiques	Éval.

Tableau 1.7 Indications de l'IRM cardiovasculaire pour les cardiopathies congénitales

Indication	Classe
Indications générales	
1. Bilan initial et surveillance des cardiopathies congénitales chez l'adulte	I
Indications spécifiques	
1. Quantification de l'importance d'un shunt (Qp/Qs)	I
2. Malformation du situs atrial	I
Hétérotaxie viscéroatriale	II
Cardiopathies congénitales complexes	I
3. Anomalies auriculaires et du retour veineux	
Communication interauriculaire	II
Retour veineux pulmonaire anormal, notamment anomalie complexe	I
Anomalie du retour veineux systémique	I
Obstruction du retour veineux systémique ou du retour veineux pulmonaire en postopératoire	I
4. Anomalies des valves auriculoventriculaires	
Anomalies anatomiques des valves mitrales et tricuspides	II
Anomalies valvulaires fonctionnelles	II
Maladie d'Ebstein	II
Communication atrioventriculaire	II
5. Anomalies ventriculaires	
Communication interventriculaire	III
Communication interventriculaire rentrant dans un cadre polymalformatif	I
Anévrysme et diverticule ventriculaire	II
Communication interventriculaire supracristallienne	I
Évaluation des volumes ventriculaires droit et gauche, masse et fonction	I

(suite)

Tableau 1.7 Suite	
Indication	Classe
6. Anomalies des valves sigmoïdes	
Sténose pulmonaire et dysplasie valvulaire	III
Sténose pulmonaire supravalvulaire	II
Régurgitation pulmonaire	I
Sténose pulmonaire valvulaire	III
Sténose sous-aortique	III
Sténose artérielle supravalvulaire	I
7. Anomalies artérielles	
Transposition des gros vaisseaux	II
Suivi postopératoire des shunts	I
Anévrisme du sinus de Valsalva	I
Coarctation aortique	I
Coarctation vasculaire	I
Canal artériel pulmonaire	III
Persistance du canal artériel	I
Anomalies des artères coronaires chez l'enfant	Éval.
Origine anormale des artères coronaires chez l'adulte et l'enfant	I
Atrésie pulmonaire	I
Sténose pulmonaire centrale	I
Sténose pulmonaire périphérique	Éval.
Dérivations cavopulmonaires	I

Tableau 1.8 Indications de l'IRM cardiovasculaire en cas d'artériopathie acquise	
Indication	Classe
1. Diagnostic et suivi des anévrismes de l'aorte thoracique, dont la maladie de Marfan	I
2. Diagnostic et bilan préthérapeutique des anévrismes de l'aorte abdominale	II
3. Dissection aortique	
Diagnostic de dissection aortique aiguë	II
Diagnostic et suivi d'une dissection aortique chronique	I
4. Diagnostic d'un hématome mural de l'aorte	I
5. Diagnostic d'un ulcère athéromateux pénétrant	I
6. Anatomie et flux artériopulmonaire	I
7. Embolie pulmonaire	
Diagnostic des embolies pulmonaires proximales	III
Diagnostic des embolies pulmonaires périphériques	Éval.
8. Évaluation des veines thoraciques, abdominales et pelviennes	I
9. Évaluation des veines de jambe	II
10. Évaluation des artères rénales	I

Indication	Classe
11. Évaluation des artères mésentériques	II
12. Évaluation des artères iliaques fémorales et des extrémités inférieures	I
13. Évaluation des troncs supra-aortiques	I
14. Évaluation des artères carotides cervicales	I
15. Évaluation des plaques d'athérosclérose au niveau carotidien et aortique	III
16. Évaluation des veines pulmonaires	I
17. Fonction endothéliale	Éval.

■ Contre-indications et précautions

Au voisinage d'un système d'IRM, on doit rester vigilant pour éviter d'éventuelles projections de matériaux ferromagnétiques ou de matériaux électroniques à proximité du champ magnétique principal. Plusieurs cas de blessures et quelques cas mortels ont été rapportés. Il est important de faire remplir par le patient une check-list avant l'examen qui sera utilisée par le technicien de radiologie (Figure 1.10). Il est également important d'entraîner le personnel aux conditions de l'évacuation rapide d'un malade hors du champ magnétique pour réaliser des manœuvres de réanimation cardiorespiratoire.

L'imagerie cardiovasculaire est une modalité non invasive qui n'utilise pas de radiation ionisante.

Les produits de contraste à base de gadolinium ont une néphrotoxicité très basse, mais certains produits de contraste ont été mis en cause dans la survenue de fibrose systémique en cas d'insuffisance rénale.

Les patients porteurs de valve cardiaque, de suture sternale, de prothèse articulaire, de stent coronaire peuvent être examinés sans problème.

Les IRM cardiovasculaires de patients porteurs de stimulateur cardiaque permanent et de défibrillateur cardiaque automatique ne peuvent être effectuées que dans des centres spécialisés, et demeurent donc aujourd'hui une contre-indication relative. Les clips vasculaires intracrâniens ferromagnétiques restent une contre-indication absolue.

Il n'existe pas de risque connu durant la grossesse, mais c'est un principe de précaution que d'éviter de réaliser une IRM cardiovasculaire pendant le premier trimestre. En cas d'allaitement, il doit être suspendu 24 h après l'utilisation d'un produit de contraste à base de gadolinium.

Check-list destinée au patient avant une IRM cardiovasculaire

Nom : Date de naissance :

Hôpital : Taille : Poids :

Il n'y a pas d'effet secondaire de cet examen.
Les questions que l'on vous pose constituent des précautions nécessaires.

	Oui	Non
Êtes-vous porteur d'un stimulateur cardiaque (pacemaker ou sonde cardiaque de stimulation) ?		
Est-ce que vous avez d'autres implants (implant cochléaire, implant médullaire, dérivation ventriculaire programmable) ?		
Avez-vous été opéré au niveau cérébral ou vertébral ?		
Avez-vous été blessé à l'œil ? Est-il possible qu'il reste des pièces métalliques intraorbitaires ?		
Avez-vous été opéré du cœur ?		
Avez-vous déjà eu des crises comitiales, du diabète, de l'asthme ou d'autres allergies ?		
Avez-vous des antécédents d'insuffisance rénale, ou êtes-vous actuellement en dialyse ?		
Portez-vous un patch ?		
Êtes-vous enceinte ?		
Avez-vous bien retiré votre montre, vos cartes bancaires, vos cartes électroniques, vos clés, vos pièces de monnaie, vos bijoux, vos épingles à cheveux (les bijoux en or ne posent aucun problème) ?		
Cochez les cases		

Il est possible qu'il soit nécessaire d'injecter un produit de contraste durant cet examen, appelé gadolinium. Cette injection présente très peu d'effets secondaires. Il est possible qu'au moment de l'injection vous puissiez ressentir une céphalée transitoire, une nausée, ou un goût métallique dans la bouche. Les effets secondaires graves sont extrêmement rares.

En signant cette circulaire, vous attestez que la procédure vous a été correctement expliquée par une personne qualifiée et que vous avez répondu correctement aux questions ci-dessus.

Signature : Témoin :

Date :

Figure 1.10 On demande aux patients de remplir ce questionnaire à leur arrivée à l'IRM cardiovasculaire. Le formulaire rempli est analysé par un personnel entraîné avant de commencer l'examen. Certaines de ces questions sont destinées à déterminer d'éventuelles contre-indications à l'IRM cardiovasculaire et d'autres à souligner l'attention sur les antécédents médicaux qui ne constituent pas en eux-mêmes des contre-indications.

Cardiopathie ischémique

Katharina Kiss

■ Introduction

L'IRM cardiovasculaire constitue la modalité de référence (gold standard) pour le diagnostic d'infarctus du myocarde et pour l'évaluation des anomalies de la contractilité globale ou régionale. Ces anomalies de la contractilité peuvent être observées lors d'infarctus du myocarde ou lors de lésions ischémiques. Les anomalies contractiles induites par le stress constituent des marqueurs précoces de la maladie coronarienne et peuvent être mises en évidence avant l'apparition de signes cliniques ou de modifications électrocardiographiques (figure 2.1). L'IRM cardiovasculaire peut également faire le diagnostic de sténose coronaire significative par l'analyse de la perfusion myocardique, même si, dans ce dernier cadre, les données cliniques restent actuellement préliminaires. Le protocole d'imagerie doit être celui qui a été décrit dans le premier chapitre. L'évaluation de la fonction ventriculaire globale et régionale se fait par l'analyse des coupes en mode ciné-IRM. Les trois plans quatre cavités, deux cavités et petit axe sont indispensables; d'autres plans de coupe peuvent être programmés en fonction des résultats des précédents. Les acquisitions dans ces mêmes plans sont répétées après injection de gadolinium.

■ Infarctus du myocarde

La nécrose myocardique est rapidement observée après l'occlusion de l'artère coronaire. Les lésions ischémiques progressent des régions sous-endocardiques aux régions sous-épicaudales. L'évaluation transmurale des modifications ischémiques aiguës ne peut être analysée par les modifications électrocardiographiques, et est au contraire bien évaluée en IRM cardiovasculaire. La démonstration en IRM cardiovasculaire du territoire infarci est utile pour le diagnostic, pour l'évaluation pronostique, afin d'évaluer le risque de survenue d'insuffisance cardiaque et pour le choix des indications de revascularisation coronaire par voie percutanée ou par pontage.

L'association d'un amincissement myocardique et d'une akinésie localisée visibles sur les coupes en mode ciné-IRM fait évoquer le diagnostic d'infarctus du myocarde (figure 2.2). L'analyse topographique précise de l'étendue des lésions ischémiques

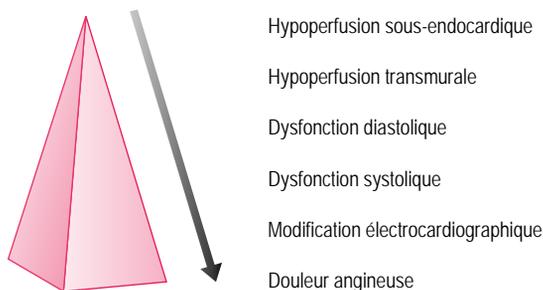


Figure 2.1 L'enchaînement des différentes manifestations de l'ischémie montre que la douleur angineuse n'apparaît que tardivement au cours de l'épisode ischémique aigu.

est réalisée sur les coupes dites de viabilité, réalisées tardivement après injection de gadolinium.

Les chélates de gadolinium sont des produits de contraste dont la distribution est limitée à l'espace extracellulaire. Le gadolinium s'accumule donc au sein de l'interstitium anormal du myocarde affecté par une lésion ischémique aiguë ou chronique. En cas de lésion ischémique aiguë, le gadolinium diffuse au sein du tissu nécrotique. En cas de lésion ischémique chronique, le gadolinium diffuse au sein des lésions fibreuses cicatricielles.

La prise de gadolinium est à l'origine d'un raccourcissement du temps de relaxation longitudinale T1, elle est donc à l'origine d'une augmentation de signal sur les images pondérées en T1. C'est ce principe qu'on exploite avec les séquences d'inversion-récupération dites « de viabilité ».

Avec ces séquences d'inversion-récupération, le temps d'inversion est déterminé par l'opérateur, afin d'optimiser le contraste entre le myocarde normal et le myocarde infarci. Cette sélection d'un temps d'inversion optimal permet de différencier le myocarde normal, qui apparaît en noir, du myocarde infarci, qui apparaît en blanc. C'est ce phénomène qui est à l'origine de l'aphorisme utilisé en cas de lésion ischémique : « Le blanc est mort » (figure 2.3).

On se sert également de l'IRM cardiovasculaire afin de démontrer des zones d'obstruction microvasculaire en se servant de séquences réalisées précocement après injection de gadolinium. L'obstruction microvasculaire qui apparaît lors des premières heures après l'infarctus du myocarde constitue un facteur de mauvais pronostic et correspond à ce qu'on appelle le phénomène du *no-reflow*. La traduction IRM de ces zones de *no-reflow* se fait sous la forme d'une zone qui apparaît en noir au sein de la région infarctée du fait de l'absence de captation de gadolinium par rapport au tissu ischémique de voisinage normalement perfusé (figure 2.4). Ces images doivent être distinguées des thrombus ventriculaires gauches qui, eux aussi, sont à l'origine d'hyposignal (figure 2.5). Les images de perfusion précoce sont obtenues avec les mêmes séquences que les séquences dites de viabilité, mais elles sont acquises dans les premières 5 min qui suivent l'injection de produit de contraste.

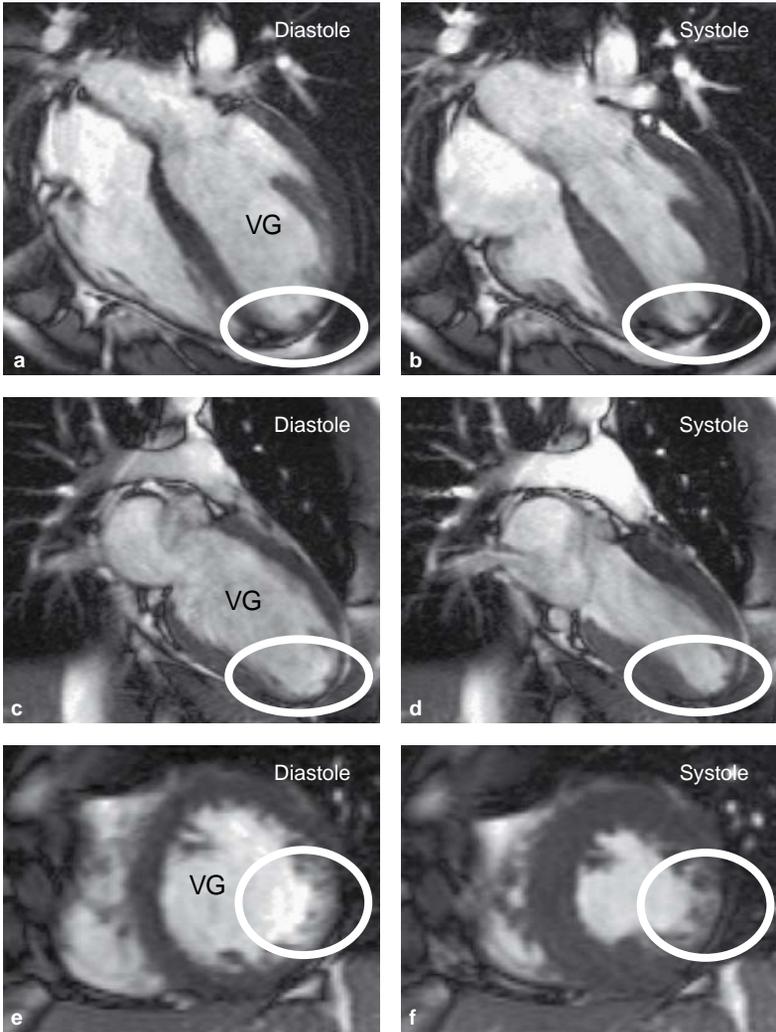


Figure 2.2 IRM cardiovasculaire avant injection de contraste, réalisée chez un homme de 26 ans hospitalisé pour dyspnée, malaise et palpitations. **a,b.** Coupes quatre cavités en diastole et en systole. **c,d.** Coupes deux cavités en diastole et en systole. **e,f.** Coupes petit axe médioventriculaires en diastole et en systole. La comparaison des images diastoliques et systoliques montre une dilatation ventriculaire gauche globale avec un amincissement et une akinésie de la paroi latérale qui s'étend jusqu'à l'apex (ellipse blanche).

Au contraire, les séquences dites de viabilité réalisées tardivement après injection de produit de contraste sont réalisées au moins 5 min après l'injection de produit de contraste. Elles peuvent être réalisées jusqu'à 20 min après injection. Pour les séquences réalisées précocement après injection, des coupes deux cavités, quatre cavités, chambre de chasse du ventricule gauche sont réalisées systématiquement. Sur les coupes

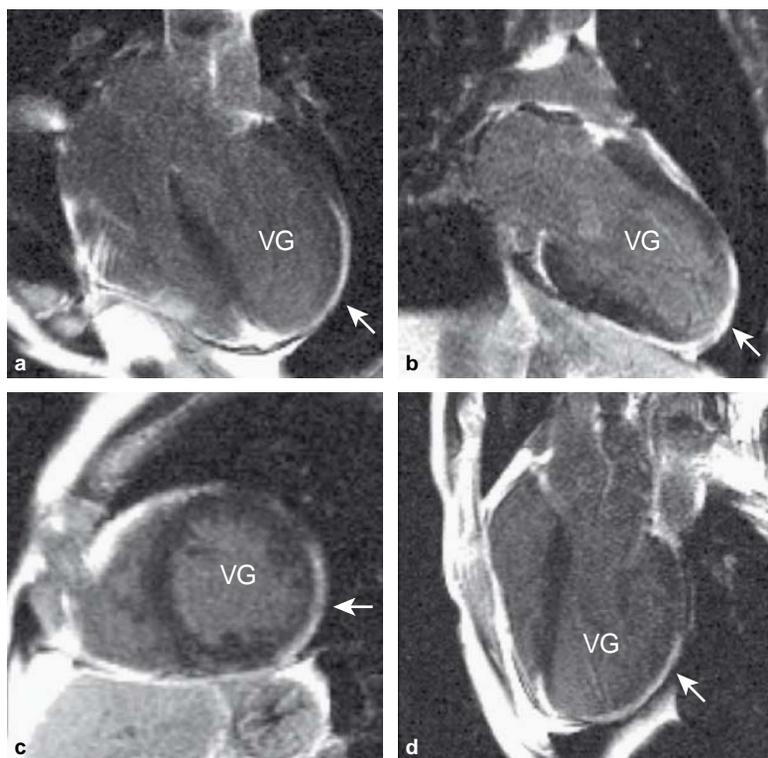


Figure 2.3 La séquence de viabilité réalisée chez le même patient que celui étudié en [figure 2.2](#) montre un rehaussement transmural dans le territoire de l'artère circonflexe (flèche blanche) sur les coupes quatre cavités (**a**), deux cavités (**b**), petit axe médioventriculaire (**c**), chambre de chasse du ventricule gauche (**d**).

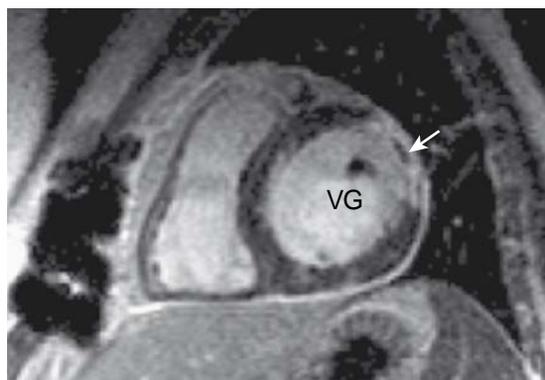


Figure 2.4 La coupe petit axe médioventriculaire réalisée précocement après injection de produit de contraste chez un malade présentant un infarctus du myocarde latéral montre une petite zone en hyposignal correspondant à la zone d'obstruction microvasculaire au sein de la région infarctée (flèche blanche).

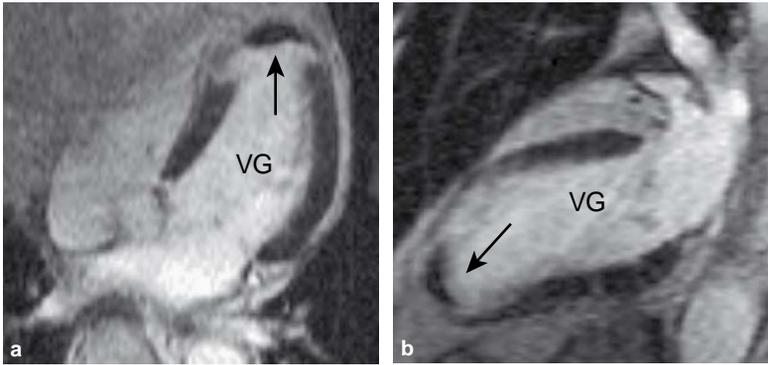


Figure 2.5 Coupe quatre cavités (a) et deux cavités (b) chez un homme de 74 ans ayant des antécédents d'infarctus du myocarde dans le territoire de l'artère interventriculaire antérieure. Les coupes réalisées précocement après injection de produit de contraste montrent un thrombus apical ventriculaire gauche (flèche noire) au contact d'un infarctus transmural.

tardives, dites de viabilité, des coupes petit axe et grand axe sont obtenues de façon systématique. Des plans de coupe supplémentaires peuvent être réalisés en fonction des anomalies détectées sur la première série de coupes. En fonction de la séquence obtenue, on parle respectivement de rehaussement précoce ou de rehaussement tardif.

Ces coupes après injection sont généralement réalisées en une vingtaine de minutes. On débute par l'injection de gadolinium, la réalisation des coupes précoces puis la détermination du temps d'inversion optimal. Les images tardives sont idéalement obtenues durant la diastole afin de minimiser les mouvements cardiaques. Une bande de présaturation couvrant le rachis est utilisée afin de diminuer les artéfacts de répétition du signal intense du liquide cébrospinal (figure 2.6). Le gadolinium est injecté à la dose de 0,1 mmol/kg, lors d'une injection en bolus réalisée à partir d'une veine périphérique. Pour les séquences précoces, on utilise un temps d'inversion de 440 ms qui est réduit à environ 320 ms pour les acquisitions tardives. Lors de la répétition des coupes tardives, le temps d'inversion est progressivement augmenté jusqu'à 440 ms afin de maintenir l'annulation du signal du myocarde normal (figure 2.7). La réalité des anomalies détectées doit être confirmée en inversant la direction du codage de phase afin de s'assurer qu'il ne s'agit pas d'artéfacts (figure 2.8); on parle de « permutation de la phase ».

Ainsi, dans le cadre des cardiopathies ischémiques, l'IRM cardiovasculaire peut :

1. évaluer la fonction contractile myocardique globale et régionale;
2. analyser l'épaississement pariétal;
3. rechercher les zones d'obstruction microvasculaire, les thrombus et les zones d'infarctus transmural sur les séquences précoces et sur les séquences tardives.

Le compte rendu doit relever les résultats de la fonction myocardique, du rehaussement précoce et du rehaussement tardif.

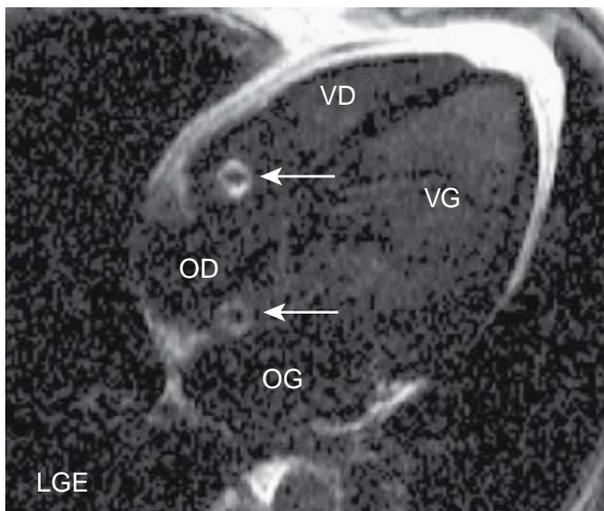


Figure 2.6 La séquence quatre cavités réalisée tardivement après injection de produit de contraste montre des artefacts de répétition du liquide cébrospinal (flèches blanches) dans le sens du codage de phase.

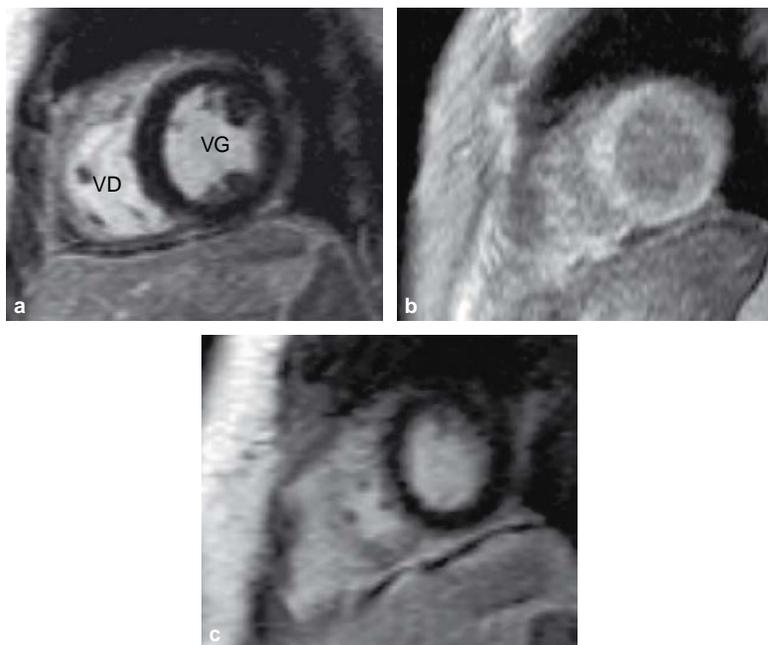


Figure 2.7 Image petit axe médioventriculaire tardive qui montre les variations du signal du myocarde en fonction du temps d'inversion : temps d'inversion trop court (a), temps d'inversion trop long (b), temps d'inversion correct (c).

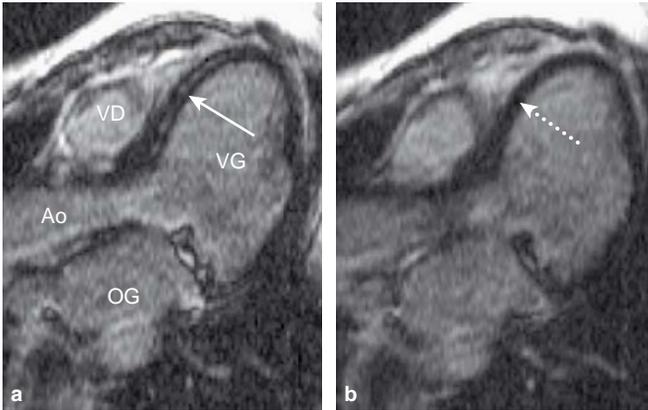


Figure 2.8 Coupe chambre de chasse du ventricule gauche (LVOT) qui montre un rehaussement tardif d'origine artéfactuelle au sein du septum interventriculaire (**a.** flèche blanche continue), lequel disparaît lorsqu'on permute la direction du codage de phase (**b.** flèche blanche discontinue).

■ Viabilité myocardique

Un myocarde viable est caractérisé par des anomalies contractiles qui vont récupérer spontanément après un infarctus du myocarde (myocarde sidéré) ou après une restauration du flux coronaire (myocarde hibernant). L'IRM cardiovasculaire est capable de faire la distinction entre le myocarde viable et le myocarde non viable en se servant des séquences tardives dites de viabilité. Effectivement, lorsque le myocarde reste viable, les anomalies de contractilité sont présentes mais il n'existe pas ou peu de rehaussement tardif. La confrontation des résultats de l'IRM cardiovasculaire et des données cliniques permet de finaliser le diagnostic. La sidération myocardique constitue un phénomène transitoire observé en cas d'ischémie myocardique, généralement provoquée par une occlusion coronaire aiguë. Au contraire, dans des conditions d'hypoperfusion chronique, généralement liée à des sténoses coronaires serrées, une hibernation myocardique peut être à l'origine de troubles de contractilité.

L'hibernation myocardique est généralement observée en cas d'atteinte multitrunculaire et se traduit le plus souvent par des anomalies de la fonction ventriculaire. Des troubles contractiles peuvent persister 6 mois, voire plus après revascularisation. L'évaluation de la viabilité myocardique est réalisée à l'aide des séquences précédemment décrites. C'est la confrontation des coupes obtenues en mode ciné-IRM et des séquences tardives dites de viabilité qui permet l'évaluation des paramètres suivants :

1. épaissement pariétal et contractilité ;
2. présence ou absence d'anomalie de la contractilité, à confronter à la
3. présence ou absence de rehaussement tardif, qui peut être ou non transmural.

Par exemple, la visualisation d'un amincissement pariétal, d'anomalies contractiles et d'un rehaussement tardif est la traduction d'un myocarde non viable

fibrocatriciel. Au contraire, une hypocontractilité associée à une épaisseur normale du myocarde sans rehaussement tardif est la traduction d'un myocarde viable en hibernation (figure 2.9). C'est la corrélation entre les coupes ciné-IRM et les résultats après injection qui constitue la base de l'analyse du myocarde dans le cadre des cardiopathies ischémiques. De plus, les séquences tardives permettent d'évaluer le caractère transmural du rehaussement tardif, l'extension en profondeur du rehaussement tardif étant corrélée à la non-viabilité du myocarde.

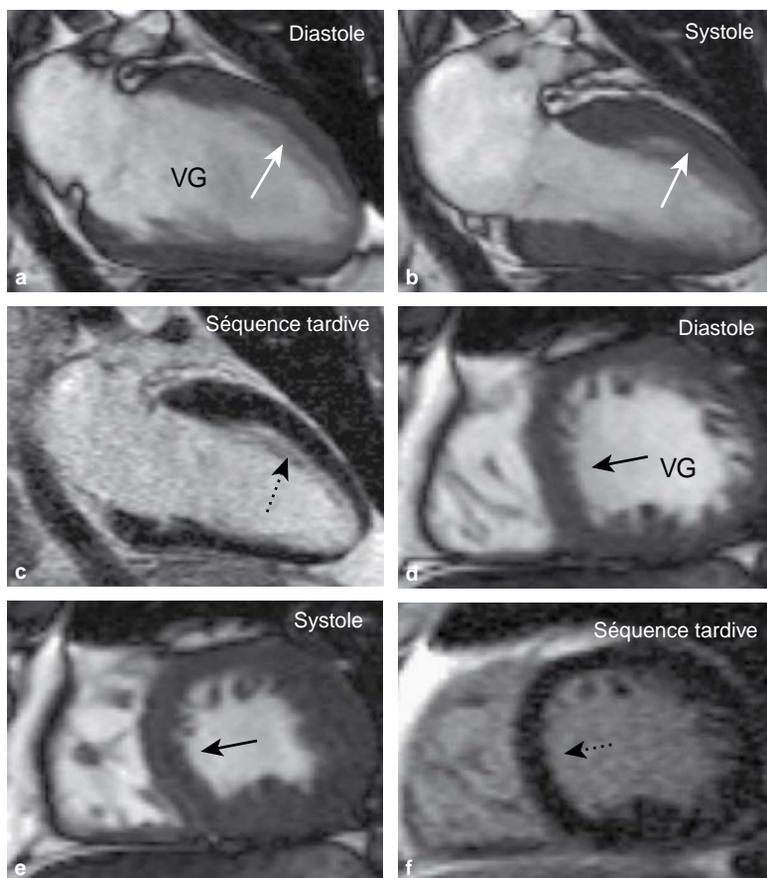


Figure 2.9 Syndrome coronaire aigu avec élévation de la troponine chez un malade de 51 ans. La coronarographie a montré une sténose à 50 % de l'interventriculaire antérieure. **a,b.** Coupe deux cavités en diastole et en systole avec la coupe correspondante après injection de gadolinium (**c**). **d,e.** Coupe petit axe médioventriculaire en diastole et en systole avec la coupe correspondante après injection de gadolinium (**f**). Les images montrent un amincissement pariétal et une hypocontractilité de la paroi antérieure (flèches blanches continues) et du septum (flèches noires continues), associé à une hypocontractilité sans rehaussement tardif (flèches noires discontinues) et à une fonction ventriculaire conservée. Ce tableau est en rapport avec une sidération myocardique.

Un rehaussement tardif intéressant moins de la moitié de l'épaisseur pariétale est corrélé à une forte probabilité de récupération fonctionnelle (figure 2.10) alors qu'un rehaussement tardif intéressant plus de 75 % de l'épaisseur myocardique est corrélé à une probabilité très basse de récupération fonctionnelle (figure 2.3).

Le compte rendu doit se servir de la segmentation myocardique en 17 segments (figure 2.11) et :

1. décrire l'analyse qualitative et quantitative de la fonction ventriculaire globale et régionale ;
2. décrire l'analyse de la sévérité des troubles contractiles et de l'importance du rehaussement tardif, en se servant de la systématisation segmentaire ;
3. effectuer la corrélation des anomalies contractiles et des anomalies de rehaussement, afin de déterminer la viabilité myocardique.

La persistance de troubles contractiles après revascularisation peut être la traduction d'un retard à la récupération et nécessite une réévaluation à 4 ou 6 mois. L'analyse de la perfusion ou une IRM de stress peut permettre de différencier un myocarde sidéré d'un myocarde hibernant.

■ Perfusion myocardique

Le flux coronaire de repos augmente avec l'exercice physique ou en condition de stress. Cette augmentation du flux coronaire est connue sous le terme de « réserve coronaire » ($\text{flux}_{\text{stress}} / \text{flux}_{\text{repos}} = \text{réserve coronaire}$) ; sa valeur normale est d'environ 4.

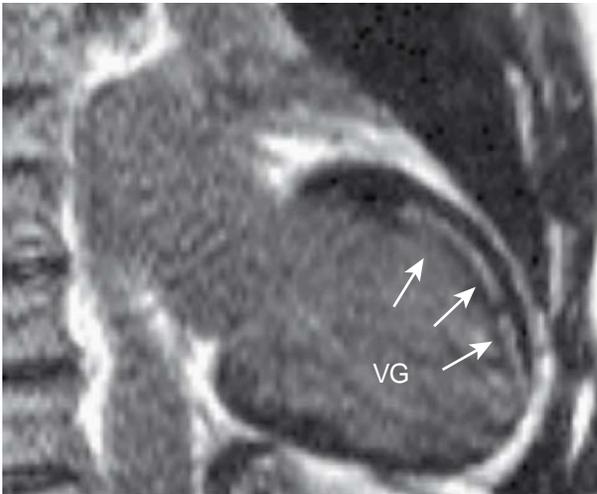


Figure 2.10 Coupe deux cavités qui montre un rehaussement tardif non transmurale de la paroi antérieure (flèches blanches) en rapport avec des lésions ischémiques sous-endocardiques.

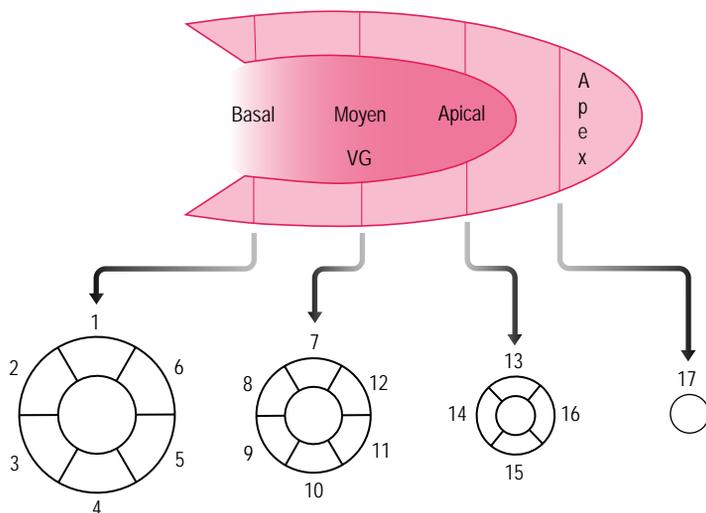


Figure 2.11 Segmentation myocardique proposée par l’American Heart Association, permettant de diviser le myocarde en 17 segments.

1 : basal antérieur ; 2 : basal antéroseptal ; 3 : basal inféroseptal ; 4 : basal inférieur ; 5 : basal inférolatéral ; 6 : basal antérolatéral ; 7 : médioantérieur ; 8 : médioantéroseptal ; 9 : médio-inféroseptal ; 10 : médio-inférieur ; 11 : médio-inférolatéral ; 12 : médioantérolatéral ; 13 : apical antérieur ; 14 : apical septal ; 15 : apical inférieur ; 16 : apical latéral ; 17 : apical.

En cas de sténose coronaire significative, le flux coronaire ne peut augmenter en condition de stress et un déficit de la perfusion devient apparent dans le territoire coronaire correspondant (figure 2.12). Le déficit de perfusion peut être identifié en IRM de perfusion avec une bonne corrélation avec les résultats de la scintigraphie. Les avantages de l’IRM cardiovasculaire par rapport à la scintigraphie sont une meilleure résolution spatiale et l’absence d’utilisation de radiations ionisantes. Les séquences généralement utilisées pour l’IRM de perfusion sont des séquences multicoupes en écho de gradient, acquises lors du premier passage du bolus de gadolinium. La résolution temporelle de bonne qualité (1 image/50–100 ms) et une résolution spatiale de qualité (coupes de 2 à 3 mm) sont indispensables afin de minimiser les artéfacts en situation sous-endocardique qui peuvent simuler des déficits de perfusion.

Le stress est généralement réalisé par l’injection d’adénosine. Les contre-indications correspondent donc aux contre-indications de l’IRM et de l’adénosine. Il faut être très prudent chez les malades présentant un angor instable, une sténose vasculaire, une bronchopathie obstructive et des troubles de conduction. Les patients ne doivent pas prendre de produits contenant de la caféine (comme le café, le thé et le chocolat) qui constituent des antagonistes de l’adénosine durant les 24h précédant l’examen. Un monitoring continu de l’électrocardiogramme (ECG) et de la pression artérielle est indispensable.

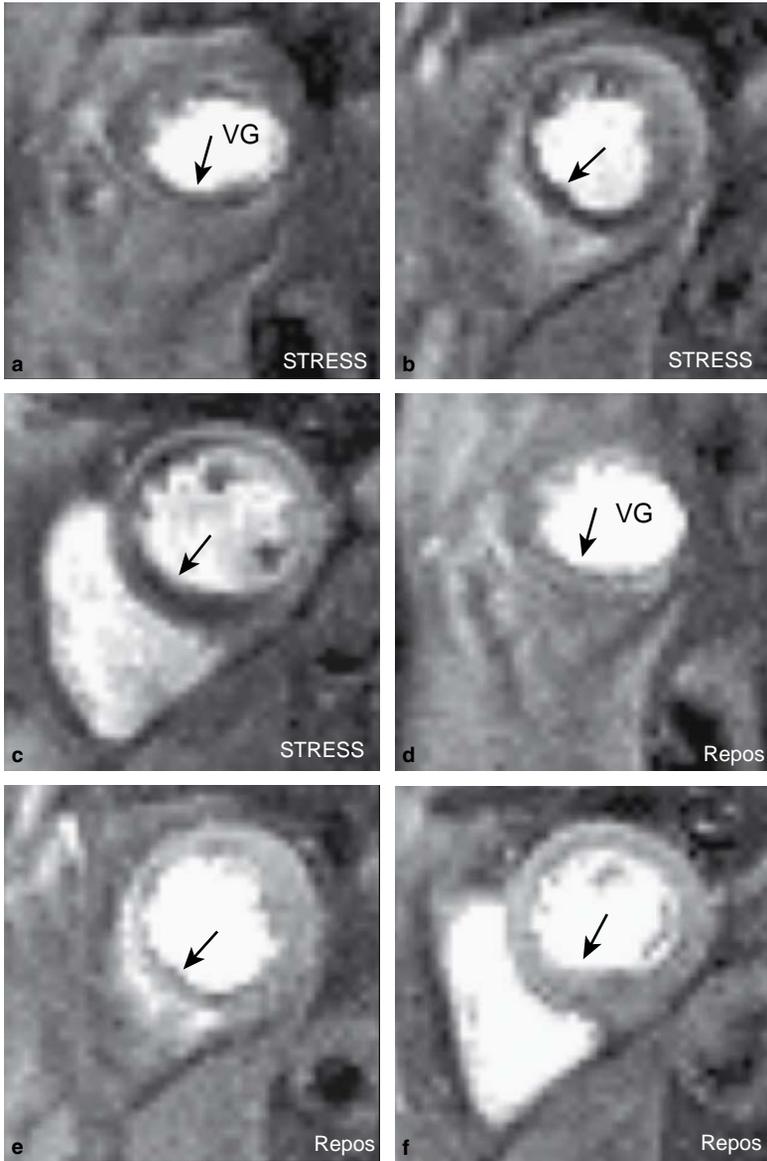


Figure 2.12 L'IRM de perfusion sur trois coupes ventriculaires petit axe obtenues après stress à l'adénosine (**a-c**) et au repos (**d-f**) chez un homme de 58 ans, avant pontage coronaire, montre une ischémie induite par le stress de la paroi inféroseptale dans le territoire de l'artère coronaire droite (flèches noires).

L'IRM de perfusion comprend également des séquences de ciné-IRM pour l'analyse de la contractilité et des séquences tardives. L'ensemble de l'acquisition nécessite environ 45 min. Les plans de coupe sont les mêmes que ceux qui sont utilisés avant injection de produit de contraste (tableau 1.1). Il est important de positionner correctement les coupes petit axe basales afin d'éviter de passer par le septum fibreux qui peut être à l'origine d'artéfacts et d'erreurs d'interprétation.

L'IRM après stress est réalisée lors de l'injection d'adénosine par voie veineuse (140 µg/kg/min pendant 4 min par une veine du pli du coude) avec un bolus de Gd-DTPA par voie veineuse (0,1 µg/kg à un débit de 7 ml/s pulsés par 15 ml de sérum physiologique au même débit par une voie d'abord de bonne qualité). L'injection de gadolinium est réalisée 2 min après le début de la perfusion d'adénosine. On réalise généralement trois plans de coupe petit axe en apnée pour réaliser des images de premier passage. La durée d'acquisition totale dépasse les 60 s et on demande aux malades de respirer doucement dès qu'ils en ont besoin. L'analyse de la perfusion au repos est réalisée 20 min après l'analyse de perfusion de stress afin de réduire les effets de la première injection avec la même technique d'injection de gadolinium. Le compte rendu de l'IRM de perfusion doit se servir de la segmentation myocardique (figure 2.11) et inclure :

1. la description anatomique des déficits de perfusion;
2. la corrélation des déficits de perfusion avec les anomalies de rehaussement tardif;
3. la description de la viabilité myocardique;
4. l'analyse quantitative de la fonction ventriculaire.

■ Épreuve de stress à la dobutamine

Il existe fréquemment une amélioration de la contractilité du myocarde viable en hibernation en situation de stress. L'agent pharmacologique utilisé est généralement la dobutamine, qui se comporte comme un agent $\beta+$, provoquant une augmentation de la consommation du myocarde en oxygène. Les patients ne doivent pas prendre de bêtabloquants durant les 24 h précédant l'examen. Un monitoring continu de l'ECG avec une mesure de la saturation et de la pression artérielle doit être réalisé parallèlement à la recherche d'effets secondaires. Ces effets secondaires peuvent comprendre des nausées, malaises, dyspnée, douleur thoracique et palpitations. Les effets secondaires graves sont des troubles du rythme ventriculaire ou des modifications ischémiques. On dispose de deux protocoles. L'injection de petites doses de dobutamine (10 µg/kg/min) afin d'évaluer la viabilité, et un protocole utilisant de fortes doses de dobutamine (40 µg/kg/min) afin de chercher des lésions ischémiques.

L'objectif de l'injection de dobutamine à faible dose est de rechercher une amélioration des troubles contractiles existant au repos afin de différencier un myocarde viable d'un myocarde non viable. L'injection de hautes doses réalise un protocole similaire à l'échocardiographie de stress à la dobutamine. Des coupes deux cavités et quatre cavités sont utilisées. L'injection commence par une posologie initiale de 5 µg/kg/min, augmentée à 10 µg/kg/min après 3 min. Lors de l'injection des doses

élevées de dobutamine, on augmente la dose de 10 µg/kg/min toutes les 4 min avec une surveillance permanente des troubles de la contractilité.

L'épreuve de stress à la dobutamine est arrêtée lorsque le rythme cardiaque maximal est atteint (rythme cardiaque maximal = 0,85 [220 – âge]) ou à l'injection de la dose maximale de dobutamine. Si l'on n'obtient pas de réponse correcte à l'injection de dobutamine, on peut alors se servir de l'injection d'atropine.

Une IRM de stress à la dobutamine est généralement réalisée en 45 min. L'analyse des résultats et le compte rendu doivent se faire en se servant de la segmentation myocardique (figure 2.11) et inclure :

1. les anomalies de la contractilité régionale et de la fraction d'éjection au repos ;
2. les améliorations de la contractilité ou la mise en évidence de nouvelles anomalies de la contractilité lors de l'épreuve de stress.

■ Indications

L'IRM cardiovasculaire peut :

1. donner des images de meilleure qualité que l'échocardiographie pour la détection des troubles de contractilité ;
2. constituer le critère de référence (gold standard) pour la quantification des fonctions ventriculaires gauches et ventriculaires droites ;
3. démontrer l'existence d'une obstruction microvasculaire et le caractère transmural des lésions ischémiques, constituant ainsi un facteur prédictif de récupération après revascularisation ;
4. permettre l'analyse de la perfusion myocardique sans utilisation de radiations ionisantes.

Au contraire, l'IRM cardiovasculaire n'est pas aujourd'hui dans la capacité de quantifier les sténoses coronaires. L'angiographie par résonance magnétique (ARM) coronaire a une valeur prédictive négative de 81 % pour l'exclusion d'atteinte coronaire proximale. L'analyse de la perméabilité des pontages peut être réalisée en IRM cardiaque, mais c'est généralement en tomographie par émission de positons que cette analyse est effectuée. Au contraire, l'ARM coronaire est de bonne qualité pour l'analyse des variations anatomiques.

Insuffisance cardiaque et cardiomyopathies

James C. Moon

■ Introduction

L'insuffisance cardiaque constitue un syndrome complexe caractérisé par une dysfonction du muscle cardiaque dans son rôle de pompe circulatoire destinée à assurer la circulation dans les vaisseaux. L'insuffisance cardiaque se traduit par des symptômes tels que dyspnée, asthénie et des signes relatifs à la surcharge hydrosodée. L'insuffisance cardiaque est associée à une importante morbidité et constitue un problème de santé publique majeur.

Les causes d'insuffisance cardiaque incluent les cardiopathies ischémiques, l'hypertension artérielle, les valvulopathies et des cardiomyopathies plus rares. Il arrive que d'autres maladies comme les affections pulmonaires ou rénales puissent simuler les signes et les symptômes de l'insuffisance cardiaque. La prise en charge de l'insuffisance cardiaque repose sur un diagnostic précis et sur la recherche de la cause. Cette enquête étiologique repose sur une évaluation clinique et sur des examens complémentaires; l'électrocardiogramme (ECG) et l'échocardiographie constituent les examens paracliniques de première intention et l'IRM cardiovasculaire est à l'origine de renseignements complémentaires relatifs à l'évaluation quantitative et qualitative de la fonction cardiaque, notamment dans le cadre des cardiomyopathies.

Les cardiomyopathies sont des atteintes cardiaques caractérisées par une dysfonction myocardique. Elles sont classifiées sur une base morphologique en cardiomyopathies hypertrophiques (CMH), cardiomyopathies dilatées (CMD), cardiomyopathies restrictives et dysplasie arythmogène du ventricule droit (DAVD) [figure 3.1]. Plusieurs cardiomyopathies sont déterminées par transmission génétique. Certaines sont caractérisées par une expression phénotypique complexe associée à des troubles de la conduction, alors que d'autres atteintes cardiaques génétiquement déterminées ne se caractérisent que par une anomalie de la conduction (QT long/court et syndrome de Brugada, anomalie des échanges transmembranaires). Il existe au moins neuf anomalies génétiques à expression musculaire qui peuvent être à l'origine du

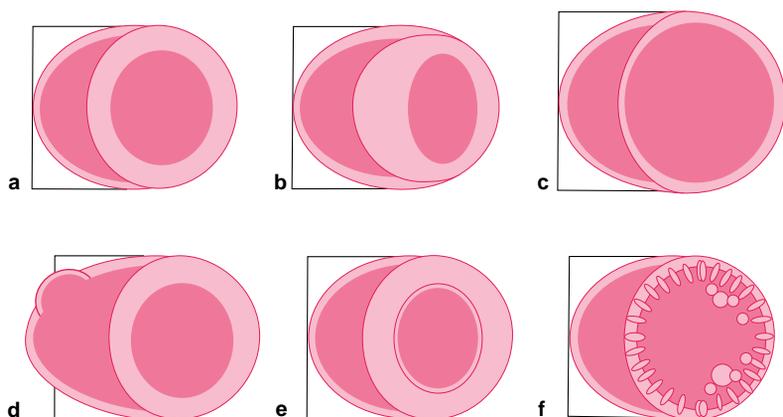


Figure 3.1 Classification morphologique des cardiomyopathies. **a.** Cœur normal. **b.** Cardiomyopathie hypertrophique. **c.** Cardiomyopathie dilatée. **d.** Dysplasie arythmogène du ventricule droit. **e.** Cardiomyopathie restrictive : les lignes endocardiques représentent les fibres longitudinales anormales. **f.** Non-compaction myocardique : la couche sous-endocardique a une structure trabéculaire avec un amincissement relatif du myocarde externe compacté.

phénotype commun de CMH, mais ces différentes mutations peuvent également s'exprimer sous la forme de CMD. Une mutation génétique peut être démontrée chez à peu près la moitié des patients porteurs de CMH, mais ces mêmes mutations génétiques peuvent être observées chez des individus ne présentant aucune manifestation phénotypique particulière. C'est dire l'importance des facteurs environnementaux, des modificateurs génétiques et de l'âge des patients. Il existe d'autres affections cardiaques connues sous le terme de *phénocopies*, telles que les glycogénoses qui peuvent être à l'origine d'un phénotype proche des maladies cardiaques génétiquement déterminées.

L'IRM cardiovasculaire constitue la technique d'imagerie de référence afin de caractériser et d'identifier les différents phénotypes des cardiomyopathies, pour rechercher une cause, pour les différencier des phénocopies, pour évaluer l'efficacité des traitements et pour analyser le pronostic de ces affections.

■ Protocole d'imagerie

L'IRM cardiovasculaire doit être à l'origine d'une information relative à la morphologie cardiaque, à la fonction cardiaque et à la caractérisation tissulaire myocardique. Le compte rendu doit inclure les données relatives :

1. aux dimensions des cavités cardiaques ;
2. à l'analyse quantitative de la fonction cardiaque et de la masse en les ramenant aux normes de références expliquées au sein du chapitre 1 ;
3. à la présence ou à l'absence d'anomalie de rehaussement sur les séquences tardives dites de viabilité.

Les spécificités du compte rendu sont soulignées au sein de chacun des cadres pathologiques.

Morphologie cardiaque

L'analyse de l'anatomie cardiaque peut être réalisée en se servant de différentes séquences ; pour cela les séquences sang blanc et sang noir sont complémentaires. Par exemple, les séquences sang noir sont indispensables à l'analyse du ventricule droit en cas de suspicion de DAVD alors que les séquences sang blanc sont indispensables à l'analyse des non-compactions myocardiques.

Fonction cardiaque

Les séquences de ciné-IRM constituent la modalité de référence (gold standard) pour l'évaluation quantitative des volumes ventriculaires et de la masse myocardique (tableau 3.1).

Les mesures obtenues en IRM sont plus reproductibles que celles qui sont obtenues en échocardiographie ; notamment, l'apex et le ventricule droit sont d'analyse plus aisée (figure 3.2). De plus, l'examen ne dépend pas de la nécessité d'une fenêtre acoustique adéquate (figure 3.3). En cas d'insuffisance cardiaque, les séquences « balancées » (séquences d'écho de gradient en *steady state free precession* [SSFP])

Tableau 3.1 Avantages de l'IRM cardiaque pour l'évaluation de la fonction ventriculaire

- Méthode fiable et reproductible
- Pas de nécessité de fenêtre acoustique de bonne qualité
- Absence de zone aveugle – Qualité de l'image uniforme
- Contraste de bonne qualité sang/myocarde même en cas d'insuffisance cardiaque
- Évaluation tridimensionnelle n'utilisant pas d'assumption géométrique
- Analyse du ventricule droit et du ventricule gauche
- Possibilité de coupes dans tous les plans de l'espace

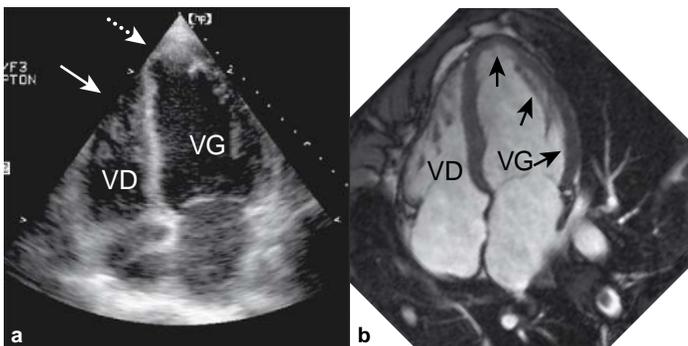


Figure 3.2 Comparaison d'une coupe quatre cavités en (a) échographie cardiaque transthoracique et (b) ciné-IRM chez le même patient. L'IRM cardiaque montre correctement le ventricule droit (flèche blanche continue), l'apex (flèche blanche discontinue) et les limites de l'endocarde (flèches noires continues), plus nettement qu'en échocardiographie.

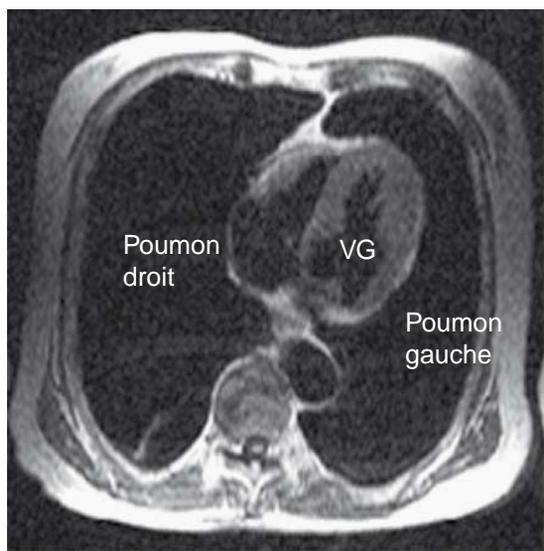


Figure 3.3 IRM cardiaque en mode sang noir chez un patient emphysémateux chez lequel une échographie cardiaque transthoracique est limitée par l'absence de fenêtre acoustique de qualité.

constituent les séquences les plus performantes, parce que le contraste sang/myocarde n'est pas dépendant du flux circulatoire, mais des différences de signal intrinsèque qui existent entre le sang et le myocarde. C'est dire qu'avec ces séquences, le compartiment sanguin est toujours différent du myocarde, même dans les zones à flux lent, au contraire de ce qu'on peut observer avec les séquences sang blanc. De plus, la durée d'acquisition des séquences SSFP peut être réduite en se servant de techniques d'imagerie parallèle qui permettent de réduire les artéfacts respiratoires chez les malades présentant une insuffisance cardiaque symptomatique et tenant difficilement une apnée longue.

En matière d'évaluation fonctionnelle, les séquences de tagging myocardique sont plus récemment apparues. Avec ces séquences de tagging, un quadrillage de lignes de marquage (tag) constitué par des lignes de présaturation se superpose sur le myocarde en diastole. La déformation de ces lignes de tag peut être analysée tout au long de la contraction myocardique systolique (figure 3.4).

La déformation des lignes de tag peut être analysée comme en doppler tissulaire, mais l'analyse en IRM cardiaque des lignes de tag peut être faite dans les trois dimensions de l'espace, sur l'ensemble du myocarde ventriculaire, en sous-endocardique comme en sous-épicardique, au contraire du doppler tissulaire qui est limité à la direction du faisceau doppler.

Caractérisation tissulaire myocardique

Le myocarde anormal peut être différencié du myocarde normal sur la base de différences de contraste intrinsèque qui peuvent être mises en évidence en IRM cardiaque.

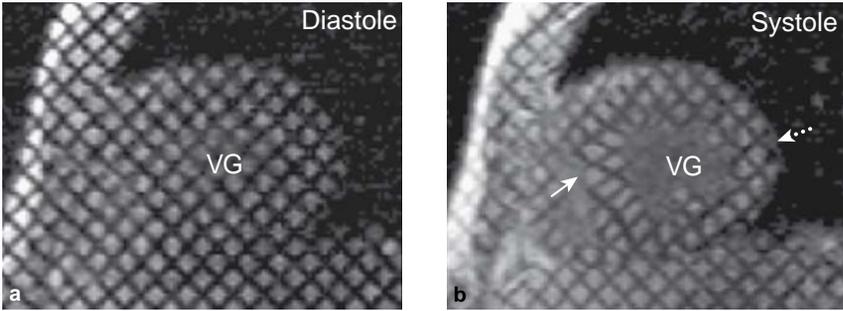


Figure 3.4 Technique de tagging myocardiographique sur une coupe petit axe médioventriculaire en (a) diastole et (b) systole chez un malade ayant eu un infarctus du myocarde. La grille de lignes de tag est positionnée pendant la diastole et la contraction myocardique se traduit en systole par des mouvements de tension et de torsion. La déformation des lignes de tag traduit une fonction contractile normale au niveau du septum interventriculaire (flèche blanche continue). Au contraire, les lignes de tag ne sont pas modifiées au niveau de la paroi latérale du ventricule gauche (flèche blanche discontinue), ce qui traduit l'existence à ce niveau d'une anomalie de la contractilité.

Par exemple, l'infiltration graisseuse de la paroi ventriculaire droite peut être démontrée en cas de DAVD en se servant de séquences d'écho de spin rapide, séquences qui peuvent être complétées par des séquences avec saturation de la graisse qui suppriment sélectivement le signal de la graisse. Parallèlement, les tissus dont la concentration en eau est augmentée, comme en cas d'œdème myocardique ou de lésion ischémique, peuvent être individualisés sur les séquences pondérées en T2 (figure 3.5). On peut également se servir d'un contraste extrinsèque sur les séquences dites de viabilité, acquises tardivement après injection de gadolinium (voir le chapitre 2). La prise de gadolinium traduit l'existence de zones myocardiques au sein desquelles il existe une augmentation du volume du compartiment interstitiel comme on l'observe en cas de fibrose, de nécrose ou d'inflammation. Il existe différents types de rehaussement, spécifiques aux différentes étiologies d'insuffisance cardiaque, qui peuvent être différenciés en se servant de l'IRM cardiaque (figure 3.6). Les lésions ischémiques sont à l'origine d'un rehaussement tardif qui se propage de la région sous-endocardique à la région sous-épicardique dans un territoire vasculaire coronaire déterminé. Au contraire, les modifications observées en cas de myocardite ont un point de départ sous-épicardique qui peut s'étendre au myocarde moyen, notamment au niveau de la paroi latérale du ventricule gauche. De plus, la comparaison des séquences de ciné-IRM et des séquences réalisées après injection de produit de contraste permet la reconnaissance des thrombus cardiaques. Ces techniques ont été abordées lors du chapitre précédent et le seront également au sein du chapitre 5, consacré aux masses cardiaques.

Enfin, l'analyse en IRM cardiaque des troncs artériels coronaires proximaux peut être réalisée, mais cette dernière technique, discutée au sein du chapitre 9, reste actuellement sous-optimale.

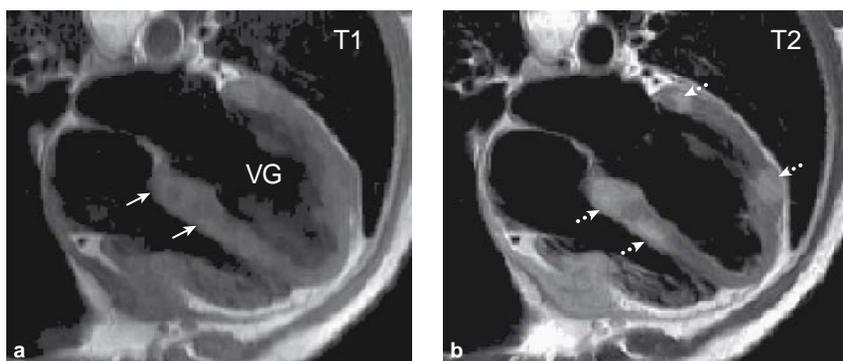


Figure 3.5 Les séquences pondérée en T1 (**a**) et pondérée en T2 (**b**) en incidence quatre cavités montrent une infiltration du septum interventriculaire dans un cas de lymphome myocardique. Le septum est déformé par l'infiltration lymphomateuse sur l'image pondérée en T1, mais il n'existe pas de différence de signal (flèches blanches continues). Au contraire, les zones œdématisées sont à l'origine d'un hypersignal sur les séquences pondérées en T2 au niveau du septum, mais également au niveau de la paroi latérale du ventricule gauche (flèches blanches discontinues).

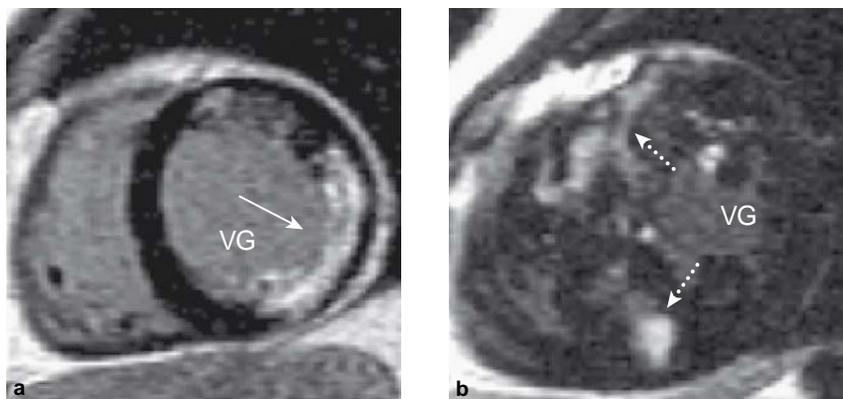


Figure 3.6 Prise de contraste anormale sur les séquences dites de viabilité réalisées tardivement après injection de produit de contraste, en rapport avec des lésions ischémiques ou des lésions de fibrose. La localisation caractéristique sous-endocardique du rehaussement dans un territoire vasculaire est caractéristique de lésion ischémique (**a**. flèche blanche continue), au contraire des rehaussements non systématisés des lésions de fibrose en cas de CMH (**b**. flèches blanches discontinues).

■ Les différentes cardiomyopathies

Cardiomyopathie hypertrophique

Les CMH correspondent stricto sensu à l'expression de mutation génétique, mais les phénotopies sont également abordées ici, puisque un des objectifs de l'IRM cardiaque est de différencier les deux types d'entités (tableau 3.2).

Tableau 3.2 Phénotypes des cardiomyopathies hypertrophiques d'origine génétique**Maladies de surcharge**

Maladie d'Anderson-Fabry
 Glycogénoses
 Mucopolysaccharidoses
 Myopathies mitochondriales
 Syndrome de Noonan, ataxie de Friedreich

Hypertrophie physiologique

Augmentation de la post-charge (hypertension artérielle, rétrécissement aortique, obstruction de la chambre de chasse)
 Hypertrophie cardiaque du sportif
 Population africaine et antillaise
 Hypertrophie compensatrice (après un infarctus du myocarde)

Pathologie infiltrative

Amylose
 Amylose sénile

Vieillessement

Bourrelet sous-aortique

L'expression phénotypique des CMH est variable et se modifie au cours de la vie. L'expression précoce de ces cardiopathies génétiquement déterminées peut se faire sous la forme d'anomalies électrocardiographiques, avec une échocardiographie normale. Dans certains de ces cas, l'IRM cardiaque peut mettre en évidence des zones hypertrophiques localisées non visualisées en échocardiographie. L'IRM cardiaque est particulièrement utile pour les CMH limitées à l'apex du ventricule gauche (figure 3.7).

Les arguments en faveur de CMH apicale, quand l'hypertrophie n'est pas vue en échocardiographie, sont des ondes T négatives sur l'ECG et des anomalies échocardiographiques discrètes telles que des signes de dysfonction diastolique et d'akinésie apicale.

En cas de CMH, il est indispensable d'identifier les patients présentant un risque de mort subite. Cette stratification pronostique repose principalement sur l'analyse de facteurs de risque, tels qu'une histoire familiale de mort subite, des syncopes inexplicables, des épisodes de tachycardie ventriculaire, des anomalies à l'épreuve d'effort et une épaisseur de la paroi libre du ventricule gauche supérieure à 30 mm. En l'absence de ces facteurs de risque, on considère que le patient est à faible risque de mort subite et la prise en charge repose sur la surveillance régulière. Lorsqu'il existe deux facteurs de risque ou plus, on considère que les patients sont à haut risque de mort subite et qu'une prévention des troubles du rythme est indispensable par implantation d'un défibrillateur automatique. Lorsqu'on ne retrouve qu'un seul facteur de risque, comme dans environ un tiers des cas, les patients sont considérés à risque intermédiaire ; la prise en charge est alors moins simple. Les séquences réalisées tardivement après injection de produit de contraste peuvent participer à la stratification du

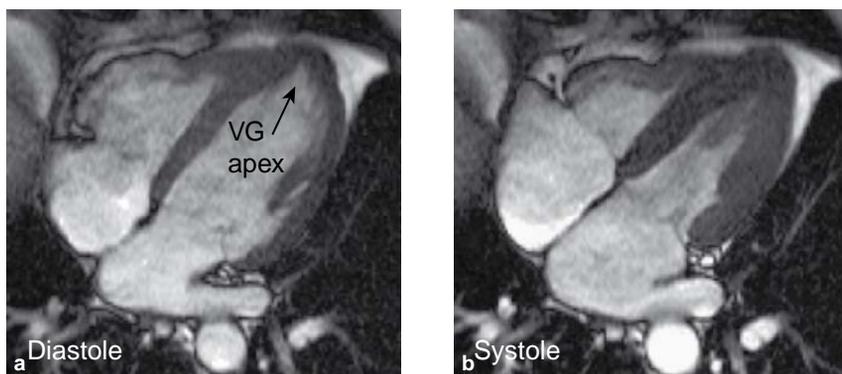


Figure 3.7 Image ciné-IRM en quatre cavités d'un homme de 51 ans présentant des anomalies ECG avec une échographie transthoracique et une coronarographie normales. Il existe une hypertrophie myocardique au niveau de l'apex du ventricule gauche en diastole (a) et une oblitération de la cavité ventriculaire gauche en systole (b), permettant le diagnostic de CMH apicale.

risque de mort subite au sein de ce dernier groupe, si l'on considère que les lésions de fibrose myocardique constituent les substrats anatomiques à l'origine de l'insuffisance cardiaque et des troubles du rythme (figure 3.8). Le risque de mort subite est plus important chez les patients présentant un rehaussement tardif anormal du myocarde et lorsqu'il existe une dilatation ventriculaire gauche et un amincissement pariétal. Cette sémiologie est particulièrement utile chez les malades les moins âgés (moins de 40 ans). L'analyse du rehaussement tardif est également utile pour différencier les CMH des maladies telles que la maladie d'Anderson-Fabry (affection génétique liée au chromosome X à l'origine d'une hypertrophie ventriculaire gauche observée chez 1 à 3 % des patients présentant un phénotype caractérisé par une CMH). Il faut penser à la maladie d'Anderson-Fabry si une CMH est découverte chez l'homme d'âge moyen chez lequel on ne retrouve aucune histoire familiale, notamment lorsqu'il n'existe pas d'obstruction de la chambre de chasse du ventricule gauche.

Dans la maladie d'Anderson-Fabry, le rehaussement myocardique prédomine à la partie basale de la paroi inférolatérale. L'amylose cardiaque peut également se présenter sous la forme d'une CMH. L'amylose est caractérisée par des dépôts amyloïdes qui s'accumulent de façon préférentielle dans la région sous-endocardique au niveau des fibres musculaires longitudinales, et qui ont pour conséquence une altération de la fonction contractile longitudinale. On observe alors une non-compliance myocardique à l'origine d'une cardiopathie restrictive. L'IRM cardiaque montre une hypertrophie myocardique globale et symétrique qui peut être associée à un rehaussement myocardique sous-endocardique et à une diminution du signal au sein des cavités ventriculaires due à un lavage rapide de gadolinium (figure 3.9).

Une obstruction de la chambre de chasse du ventricule gauche peut être observée chez les patients porteurs de CMH dans 25 % des cas. L'obstruction de la chambre de chasse du ventricule gauche est provoquée par un déplacement antérieur du

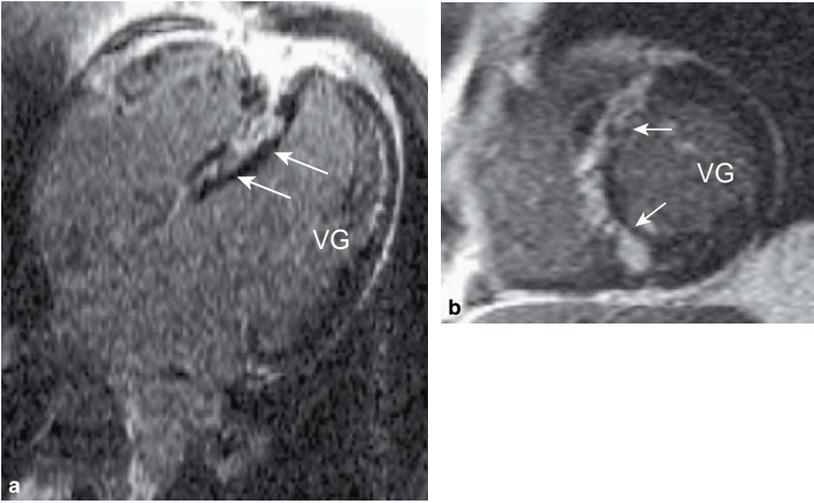


Figure 3.8 Séquence d'IRM obtenue tardivement après injection de produit de contraste chez un homme de 43 ans ayant une histoire familiale de CMH, des anomalies discrètes de la fonction ventriculaire gauche en échocardiographie et une coronarographie normale. L'image quatre cavités (a) et la coupe petit axe médioventriculaire (b) montrent un rehaussement tardif du septum interventriculaire (flèches blanches) qui n'est pas localisé à la région sous-endocardique comme en cas de lésion ischémique.

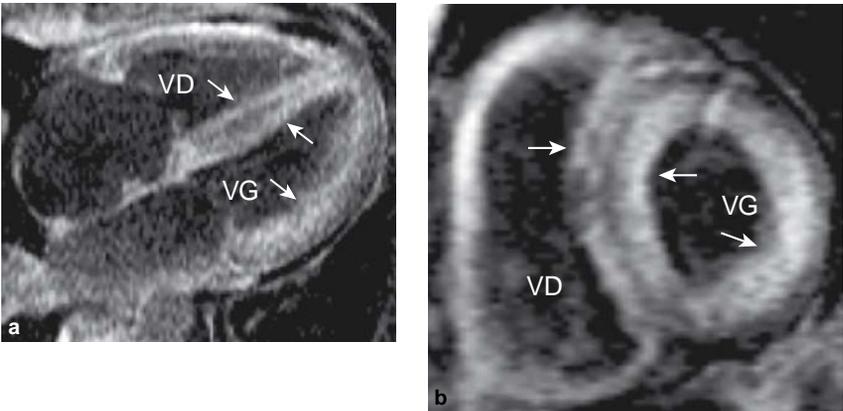


Figure 3.9 Les coupes quatre cavités (a) et petit axe médioventriculaire (b) montrent un rehaussement tardif qui épargne la région sous-épicaire caractéristique d'amylose cardiaque (flèches blanches). Dans ce contexte, le rehaussement cardiaque est la conséquence de dépôts amyloïdes et non de lésions de fibrose myocardique.

feuillet antérieur de la valve mitrale, qui gêne l'éjection du sang. Une régurgitation mitrale peut être associée. Le traitement repose sur les bêtabloquants, la résection chirurgicale ou l'alcoolisation du septum interventriculaire. L'alcoolisation consiste en l'injection d'alcool absolu dans la première artère septale afin de provoquer des lésions ischémiques dans le territoire du septum interventriculaire pour lever l'obstruction. La cicatrisation et le remodelage du septum peuvent être analysés en IRM cardiaque. L'IRM peut également être utilisée pour rechercher un bourrelet myocardique résiduel qui peut être à l'origine d'une obstruction persistante. Le compte rendu de l'IRM cardiaque doit spécifiquement indiquer :

1. la mesure de l'épaississement myocardique dans les différents secteurs (paroi libre, septum interventriculaire) ;
2. l'existence d'une obstruction de la chambre de chasse du ventricule gauche et d'un déplacement antérieur systolique du feuillet antérieur de la valve mitrale ;
3. l'analyse morphologique, fonctionnelle et l'éventuel rehaussement sur les séquences réalisées après gadolinium.

Cardiomyopathie dilatée

L'évaluation en IRM cardiaque des CMD a différents objectifs. À un stade précoce, la dilatation ventriculaire gauche peut être quantifiée et ramenée aux critères pondérés à l'âge, au sexe et à la surface corporelle.

L'IRM cardiaque permet de distinguer les CMD des dilatations des cavités cardiaques secondaires à une cardiopathie ischémique en se servant principalement des séquences dites de viabilité, ce qui permet généralement de se passer du cathétérisme cardiaque.

En cas de dilatation des cavités ventriculaires secondaire à une atteinte myocardique ischémique, l'amincissement, le remodelage et les lésions ischémiques sous-endocardiques peuvent se traduire par un tableau morphologique très similaire de celui qu'on observe en cas de CMD. En cas de pathologie ischémique, les coupes réalisées tardivement après injection, dites de viabilité, montrent le rehaussement tardif sous-endocardique ou transmural caractéristique des lésions ischémiques. Au contraire, dans la majorité des cas de CMD, on ne met pas en évidence de rehaussement ou un rehaussement médiomyocardique caractéristique, en rapport avec des lésions de fibrose des fibres musculaires circonférentielles (figure 3.10). Il est possible que ces zones de rehaussement tardif soient la traduction de séquelles de myocardite ancienne. Les points spécifiques suivants doivent être abordés lors du compte rendu d'une CMD :

1. analyse de la fonction ventriculaire ;
2. arguments en faveur d'une CMD par opposition à une cardiopathie ischémique ;
3. évolution des modifications fonctionnelles morphologiques et de prise de contraste par rapport aux examens antérieurs.

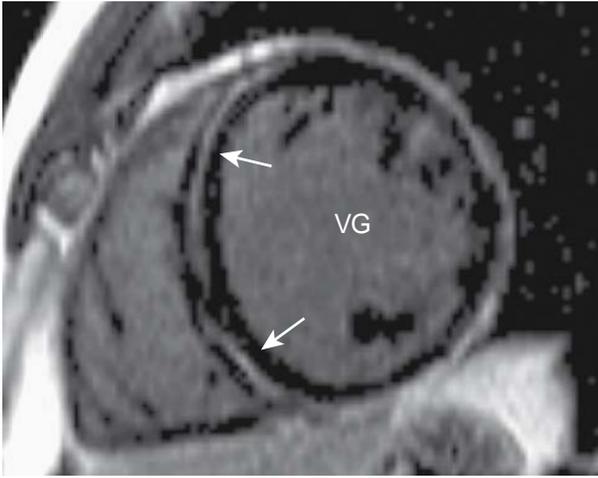


Figure 3.10 La coupe petit axe médioventriculaire réalisée tardivement après injection de produit de contraste montre le rehaussement caractéristique médioventriculaire observé en cas de CMD (flèches blanches).

Thalassémie majeure

La thalassémie est une anomalie constitutionnelle génétique très répandue dans le monde. Elle est à l'origine d'une anémie par anomalie de synthèse de l'hémoglobine. La β -thalassémie majeure constitue la forme homozygote de l'anomalie de synthèse de l'hémoglobine β et nécessite des transfusions sanguines à répétition.

La répétition de ces transfusions sanguines est à l'origine d'une surcharge en fer qui intéresse différents organes tels que le cœur, le foie, le pancréas et les glandes endocrines. Cette surcharge cardiaque en fer a pour conséquence une cardiomyopathie qui peut rapidement évoluer vers une insuffisance cardiaque. Cette insuffisance cardiaque constitue une cause fréquente de mortalité prématurée chez les malades atteints de thalassémie majeure. C'est dire l'intérêt d'une détection précoce d'une éventuelle dysfonction myocardique permettant de mettre en place un traitement par agent chélateur du fer. Il n'existe pas de critère échocardiographique permettant d'évaluer une éventuelle surcharge en fer du myocarde avant l'apparition de signes d'insuffisance cardiaque. On se sert donc d'arguments indirects, comme la mesure de la ferritine sanguine, ou l'évaluation de la surcharge ferrique sur une biopsie hépatique. En fait, le dosage de ferritine sanguine n'est pas directement corrélé à la surcharge ferrique des différents organes. Parallèlement, la surcharge ferrique du foie est peu corrélée à la surcharge ferrique du myocarde.

La concentration en fer du myocarde peut être déterminée précisément à l'aide d'une séquence d'écho de gradient multi-échos pondérée en $T2^*$ qui permet le calcul du temps de relaxation $T2^*$ (figure 3.11). La mesure du $T2^*$ réalisée sur une coupe petit axe médioventriculaire, a des valeurs normales de l'ordre de 40ms et une limite inférieure de 20ms. Chez les malades porteurs d'une thalassémie, une valeur supérieure à 20ms

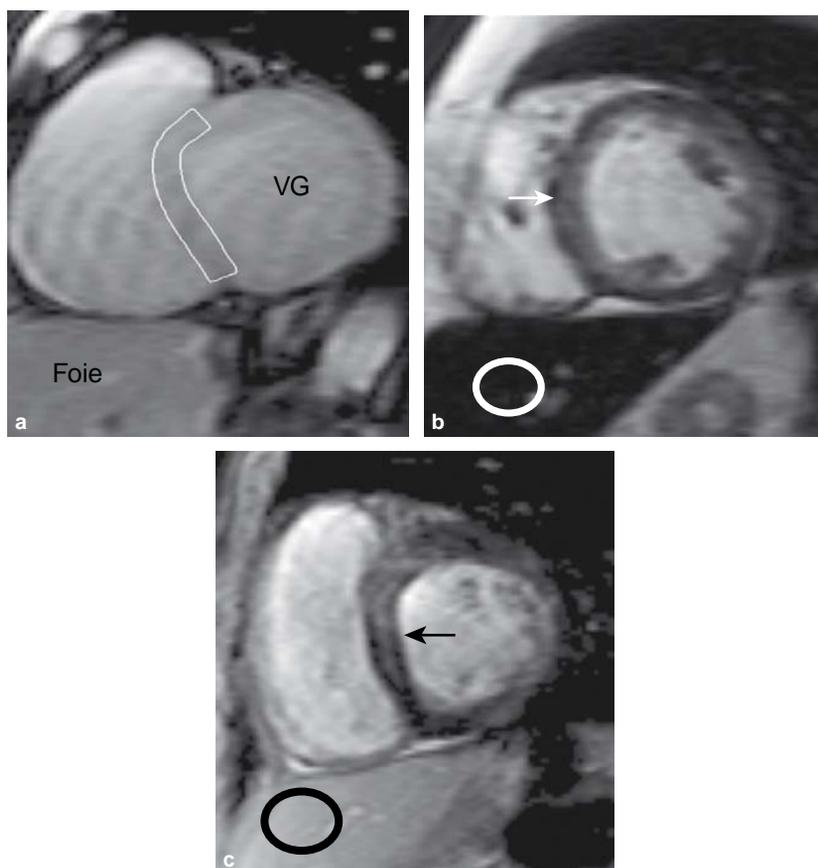


Figure 3.11 Analyse du temps de relaxation $T2^*$ en se servant de séquences d'écho de gradient. **a.** Sujet normal; la mesure du $T2^*$ est réalisée sur une coupe petit axe médioventriculaire au sein du septum interventriculaire (région surlignée). **b.** Surcharge ferrique chez un patient porteur de thalassémie majeure; la surcharge en fer se traduit par une nette diminution du signal du myocarde (flèche blanche). Il existe également une surcharge en fer du foie qui se traduit par une nette diminution du signal du foie (ellipse blanche). La diminution du signal est en rapport avec la diminution du temps de relaxation $T2^*$ du fait de la présence de particules de fer qui sont à l'origine d'hétérogénéités locales du champ magnétique. **c.** Dans cet autre cas de thalassémie majeure, il existe une surcharge ferrique du myocarde, comme en témoigne la diminution du signal du septum interventriculaire (flèche noire), alors qu'il n'existe pas de diminution du signal au sein du parenchyme hépatique (ellipse noire). Cette discordance souligne l'absence de corrélation entre la surcharge en fer du foie et du myocarde.

traduit l'absence de surcharge ferrique significative, alors qu'une valeur inférieure à 10ms traduit l'existence d'une surcharge ferrique sévère (tableau 3.3). À peu près 90 % des malades présentant une insuffisance cardiaque ont un $T2^*$ de moins de 10ms.

Dans ce dernier cas, il est urgent de mettre en place un traitement par agent chélateur du fer. La mesure du $T2^*$ au niveau du foie est effectuée sur une coupe

Tableau 3.3 Évaluation de la surcharge ferrique

Surcharge ferrique	T2* myocardique (ms)	T2* hépatique (ms)
Absente	> 20	> 6,3
Minime	14–20	2,7–6,3
Modérée	10–14	1,4–2,7
Sévère	< 10	< 1,4

transversale en positionnant une région d'intérêt en dehors des vaisseaux du foie. Une valeur supérieure à 6,3ms constitue un indicateur de l'absence de surcharge ferrique. Au contraire, une valeur inférieure à 1,4ms correspond à une surcharge en fer sévère (tableau 3.3). L'examen dure à peu près 15min. Cette technique peut bien sûr être utilisée dans les autres causes de surcharge ferrique, telles que l'hémochromatose ou la drépanocytose.

Les éléments abordés spécifiquement dans le compte rendu sont :

1. l'évaluation quantitative du T2* myocardique ;
2. l'évaluation quantitative du T2* du foie ;
3. l'évolution des valeurs du T2* et de la fonction cardiaque par rapport aux examens antérieurs.

Dysplasie arythmogène du ventricule droit

En cas de DAVD, les épisodes de tachycardie ventriculaire originaires du ventricule droit peuvent être à l'origine de mort subite. Il s'agit d'une affection autosomique dominante déterminée par des altérations des gènes codant les protéines des jonctions cellulaires appelées desmosomes. Ces anomalies se traduisent par des anomalies tissulaires avec un remplacement fibrograisseux affectant notamment la paroi libre du ventricule droit. Le ventricule gauche peut être également intéressé. Dans tous les cas, l'atteinte ventriculaire et notamment l'atteinte ventriculaire droite est mieux étudiée en IRM cardiaque qu'en échographie (figure 3.12). On peut observer des anomalies contractiles régionales de la paroi libre du ventricule droit, un amincissement pariétal, une infiltration graisseuse et des anomalies de rehaussement tardif. À un stade avancé, on peut observer des anomalies de la fonction ventriculaire droite. À un stade précoce, les anomalies peuvent être discrètes et ne doivent pas être diagnostiquées par excès : la paroi libre du ventricule droit normale peut paraître akinétique au niveau de la bandelette modératrice, la contraction pariétale du ventricule droit est difficilement modélisable et il ne faut pas prendre de la graisse épicaudique pour de la graisse intramyocardique. C'est dire que l'analyse des résultats de l'IRM cardiaque en cas de suspicion de DAVD doit être réalisée par des équipes expérimentées. Ces résultats doivent être corrélés avec les critères majeurs et mineurs de DAVD.

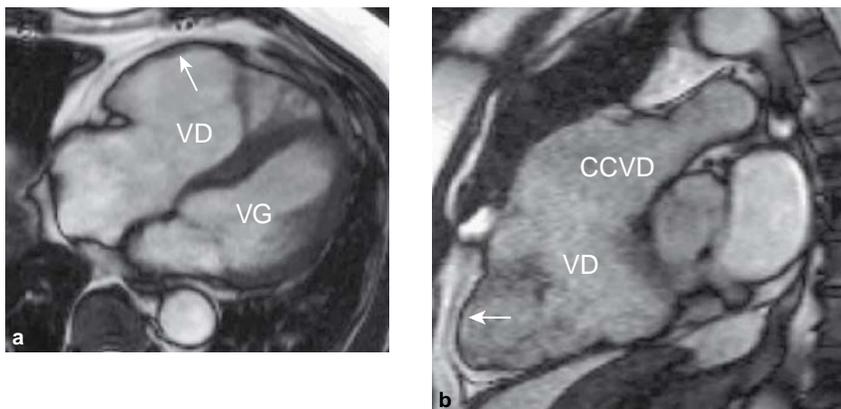


Figure 3.12 IRM cardiaque d'un patient porteur d'une DVAD adressé pour des épisodes de tachycardie ventriculaire persistant sous cordarone. Les anomalies du ventricule droit ont déjà été diagnostiquées en échographie transthoracique. **a.** La coupe quatre cavités montre une dilatation anévrysmale localisée de la paroi libre du ventricule droit qui est dyskinétique à ce niveau (flèche blanche). **b.** La coupe « chambre de chasse du ventricule droit » montre un amincissement pariétal ventriculaire droit. La zone dyskinétique et anévrysmale est également visualisée. Il existe de plus une dilatation du ventricule droit et de la chambre de chasse du ventricule droit.
CCVD : chambre de chasse du ventricule droit.

Les points spécifiques à aborder dans le compte rendu sont :

1. la quantification de la fonction biventriculaire ;
2. la présence de troubles contractiles, anomalies dyskinétiques, voire de modifications anévrysmales, notamment au niveau de la paroi libre du ventricule droit, de l'apex et de la chambre de chasse du ventricule droit ;
3. la présence d'une infiltration graisseuse ou d'un rehaussement tardif anormal.

Autres cardiomyopathies

Les cardiomyopathies restrictives peuvent être étudiées en IRM cardiaque. Les signes principaux sont une anomalie de la fonction contractile longitudinale et une dilatation auriculaire. Un rehaussement sous-endocardique peut également être observé. L'amylose cardiaque peut se traduire par un tableau de cardiopathie restrictive (figure 3.9) ainsi que la cardiopathie éosinophile par l'intermédiaire de lésions de fibrose endomyocardique.

L'atteinte cardiaque de la sarcoïdose peut se faire sous la forme de plaques de fibrose visibles sur les coupes réalisées tardivement après injection de produit de contraste. Des lésions œdémateuses myocardiques peuvent être visualisées sur les séquences pondérées en T2 en période inflammatoire de la maladie.

La non-compaction myocardique est une cardiomyopathie caractérisée par des modifications structurelles du myocarde ventriculaire gauche. Le segment myocardique

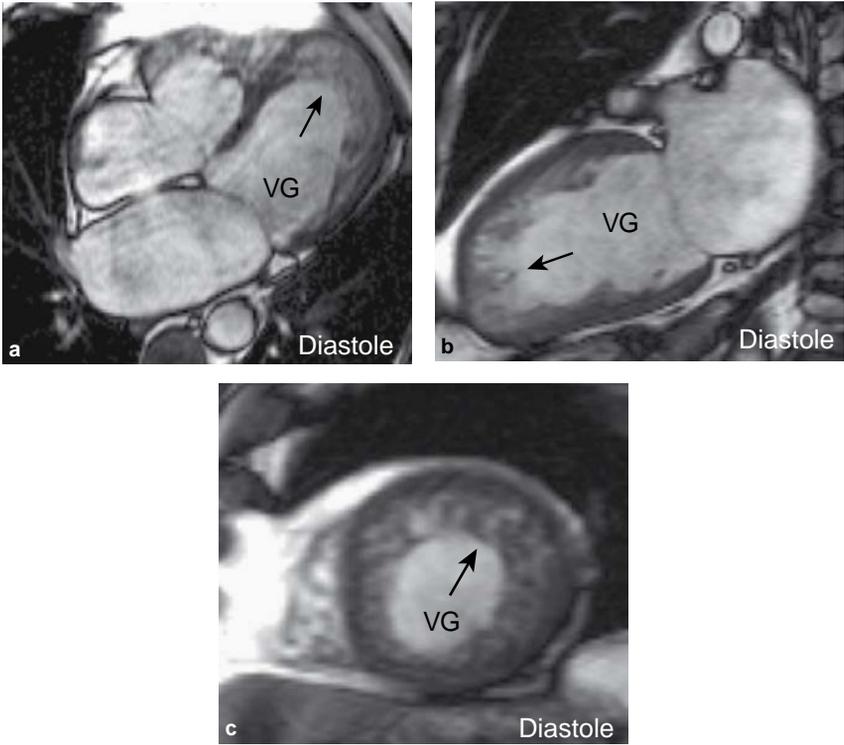


Figure 3.13 Images quatre cavités (a), deux cavités (b) et petit axe médioventriculaire (c) d'un examen ciné-IRM chez un homme de 68 ans porteur d'une non-compaction myocardique connue. L'examen montre un aspect pathognomonique fait de l'association de trabéculations multiples très marquées et de récessus trop profonds entre les trabéculations myocardiques (flèches noires).

dyskinétique est fait d'une coupe sous-épicaudique de myocarde compacté aminci et d'une couche sous-endocardique épaisse de myocarde non compacté (figure 3.13). On peut également observer une non-compaction ventriculaire droite. Cette cardiomyopathie peut se traduire par une insuffisance cardiaque, des troubles de rythme ventriculaire, des embolies systémiques. Échocardiographie et IRM cardiaque constituent des modalités d'imagerie performantes. Dans les deux cas, le diagnostic repose sur la mesure d'un rapport myocarde non compacté/myocarde compacté supérieur à 2.

■ Indications

L'IRM cardiaque peut :

1. analyser morphologie et fonction biventriculaire normalisée au sexe, à l'âge et à la surface corporelle ;
2. évaluer de façon reproductible la fonction cardiaque et ainsi permettre une surveillance régulière sous traitement ;

3 Insuffisance cardiaque et cardiomyopathies

3. détecter un œdème myocardique, une surcharge ferrique, une involution graisseuse ;
4. visualiser des lésions de fibrose myocardique et des dépôts amyloïdes ;
5. différencier une CMD d'une dilatation ventriculaire secondaire à des lésions ischémiques ;
6. différencier les phénotypes caractéristiques des cardiomyopathies.

Au contraire, l'IRM cardiaque n'est pas capable :

1. de remplacer à elle seule l'évaluation multimodalités qui inclut l'analyse des antécédents, l'examen clinique, la radiographie thoracique, l'ECG et l'échocardiographie ;
2. de faire le diagnostic de cardiomyopathie secondaire à des anomalies des échanges transmembranaires et de DAVD en l'absence d'anomalie cardiaque morphologique ;
3. de faire le diagnostic de certaines anomalies fonctionnelles (ouverture valvulaire prématurée, fermeture valvulaire prématurée, désynchronisation débutante) ;
4. de quantifier les troubles de fonction diastolique avec la résolution temporelle de l'échocardiographie ;
5. d'évaluer les patients après mise en place d'un stimulateur cardiaque (qui constitue une contre-indication persistante en pratique clinique quotidienne).

Valvulopathies

Georges E. Gentchos, Marc D. Tischler

■ Introduction

Les séquences de ciné-IRM et de cartographie des vitesses constituent les séquences de base pour explorer les valvulopathies. Les séquences d'écho de spin rapide haute résolution obtenues en apnée peuvent également être utiles pour évaluer la morphologie valvulaire. Les séquences de cartographie des vitesses synchronisées au déplacement du plan valvulaire et les séquences d'imagerie temps réel constituent des séquences en cours d'évaluation. En cas de valvulopathie, le compte rendu doit inclure :

1. l'évaluation des dimensions des cavités cardiaques ;
2. l'évaluation quantitative de la fonction cardiaque et de la masse ramenée aux normes publiées dans le chapitre 1 ;
3. l'analyse de la morphologie valvulaire.

Les données spécifiques sont indiquées plus bas pour chacune des valvulopathies.

■ Rétrécissement aortique

Il existe trois variétés de rétrécissement aortique : valvulaire, sous-valvulaire, sus-valvulaire. Le rétrécissement aortique valvulaire est le plus souvent provoqué par des altérations dégénératives de la valve aortique normalement tricuspide. Ces altérations dégénératives intéressent beaucoup plus rapidement les valves bicuspides et constituent la deuxième cause de rétrécissement aortique chez l'adulte, la sténose rhumatismale constituant la troisième cause. Le rétrécissement aortique sous-valvulaire est provoqué par une membrane fibreuse ou fibromusculaire qui rétrécit la chambre de chasse du ventricule gauche et provoque une obstruction à l'éjection. Chez l'adulte, il s'agit généralement de la récurrence d'une membrane sous-valvulaire précédemment réséquée. Le rétrécissement aortique sous-valvulaire peut également être provoqué par une cardiomyopathie hypertrophique septale prédominante, par une insertion anormale d'une valve mitrale ou d'un pilier ou par le déplacement postérieur du septum infundibulaire. Le rétrécissement aortique sus-valvulaire est rare. La sténose est généralement observée au niveau de la jonction sinotubulaire. Cette sténose sus-valvulaire est généralement observée chez des patients porteurs du syndrome de Williams, qu'il soit familial ou sporadique. Le rétrécissement aortique est longtemps

asymptomatique, la symptomatologie clinique est dominée par les douleurs angineuses, la dyspnée à l'effort et les syncopes d'effort. Du fait de la longue période de latence, l'aggravation clinique est rapide après l'apparition des symptômes. L'obstruction du ventricule gauche se traduit par une élévation des pressions ventriculaires gauche et une hypertrophie ventriculaire gauche compensatrice. Dans un premier temps, le débit cardiaque est préservé, puis on observe une diminution de la compli-ance du ventricule gauche avec augmentation des pressions télédiastoliques. L'augmentation de la consommation en oxygène du myocarde est à l'origine de lésions d'ischémie myocardique, et finalement d'une insuffisance ventriculaire gauche.

L'IRM cardiovasculaire constitue une méthode fiable pour évaluer le degré de sténose aortique et ses résultats sont bien corrélés à ceux de l'échocardiographie. De plus, elle est supérieure à l'échocardiographie pour analyser la fonction cardiaque et les conséquences morphologiques de rétrécissement aortique telles que la dilatation post-sténotique de l'aorte thoracique ascendante et l'hypertrophie myocardique ; elle permet également d'évaluer la viabilité myocardique (figures 4.1 et 4.2).

L'évaluation préthérapeutique de patients porteurs de rétrécissement aortique doit permettre une évaluation complète avant pontage coronarien et remplacement aortique. De plus, l'IRM cardiovasculaire constitue une modalité de surveillance de qualité pour l'évaluation de la fonction ventriculaire gauche, des volumes et des masses. Le protocole utilisé est indiqué au sein du chapitre 1. Les coupes ciné-IRM peuvent montrer un épaississement et une déformation des feuillets valvulaires aortiques ainsi que des turbulences au sein de l'aorte. L'imagerie dans un plan oblique parallèle au plan valvulaire peut montrer une restriction à l'ouverture et à la fermeture des valves, et permet une évaluation planimétrique de l'orifice valvulaire et de la morphologie de la valve (tricuspide ou bicuspidé). L'évaluation planimétrique peut être réalisée sur les séquences de ciné-IRM ou sur les séquences de cartographie des vitesses (figure 4.3).

La séquence de cartographie des vitesses est utilisée pour évaluer le gradient de pression transvalvulaire, en se servant de l'équation de Bernoulli modifiée :

$$\Delta P = 4(V_{\max})^2$$

où ΔP constitue le gradient de pression à travers la sténose et V_{\max} la vitesse maximale évaluée par la séquence de cartographie des vitesses, 1 à 1,5 cm au-dessus du plan valvulaire (figure 4.3d). La vitesse d'encodage maximale habituellement utilisée pour la chambre de chasse du ventricule gauche est de 2 m/s ; elle est de 2,5 à 4 m/s pour l'aorte. Cet encodage est initialement programmé à 2,5 m/s, et on augmente la vitesse d'encodage maximale si l'on observe un repliement (figure 1.3). La vitesse circulatoire est effectivement plus élevée au niveau de la valve aortique qu'au niveau de la valve mitrale. On se sert de séquences de cartographie des vitesses, de séquences de ciné-IRM et de séquences d'écho de spin rapide pour évaluer le niveau d'obstruction du rétrécissement aortique. L'ensemble des séquences doit être utilisé afin d'être sûr de bien visualiser un éventuel anneau sous-aortique. L'ensemble de ces séquences est programmé à partir du repérage obtenu sur les séquences réalisées dans l'incidence chambre de chasse du ventricule gauche.

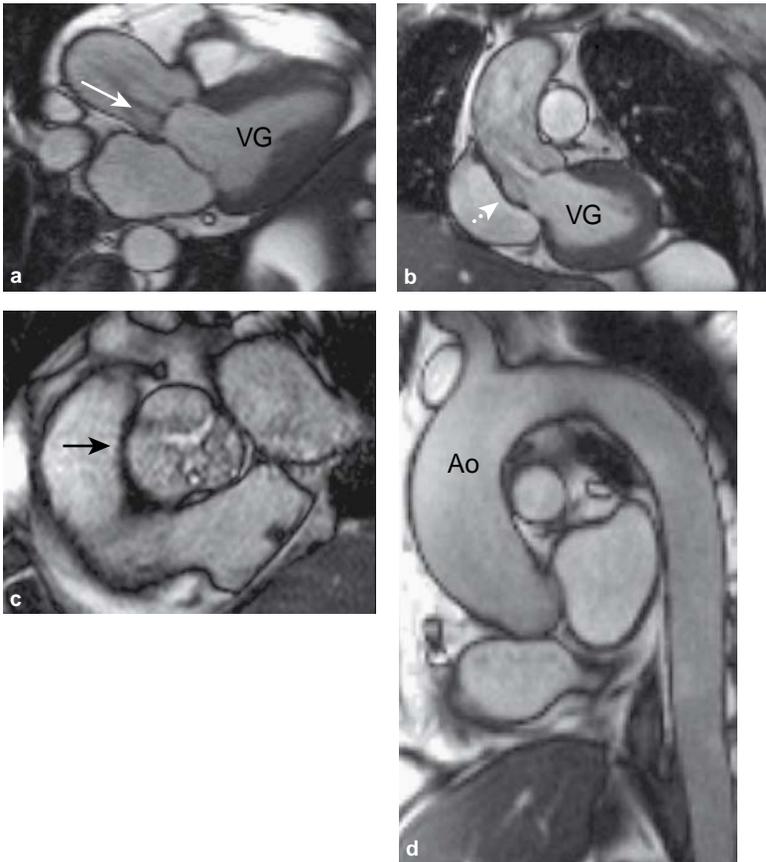


Figure 4.1 Séquence de ciné-IRM chez un patient de 66 ans porteur d'un rétrécissement aortique peu serré. L'incidence chambre de chasse du ventricule gauche (a) montre une zone vide de signal au niveau de la valve aortique qui traduit un flux turbulent (flèche blanche continue). Il n'y a pas d'hypertrophie ventriculaire gauche. L'incidence frontale (b) montre une discrète dilatation de la racine de l'aorte au niveau des sinus de Valsalva (flèche blanche discontinue). La valve aortique est tricuspide (c. flèche noire) et l'aorte thoracique ascendante est peu dilatée (d). L'évaluation de la fonction ventriculaire gauche dans le plan petit axe montre que la fonction ventriculaire gauche est normale.

On évalue la sévérité du rétrécissement aortique comme suit : minime : $> 1,5 \text{ cm}^2$; modéré : $1,0$ à $1,5 \text{ cm}^2$; sévère : $< 1,0 \text{ cm}^2$; critique : $< 0,8 \text{ cm}^2$. En cas de rétrécissement aortique serré, le gradient transvalvulaire est généralement supérieur à 50 mm Hg .

Les points spécifiques devant figurer dans le compte rendu sont :

1. l'évaluation de la sévérité du rétrécissement aortique, en se servant de la vitesse maximale transvalvulaire, de l'évaluation planimétrique de la surface sténotique et de la fonction myocardique ;

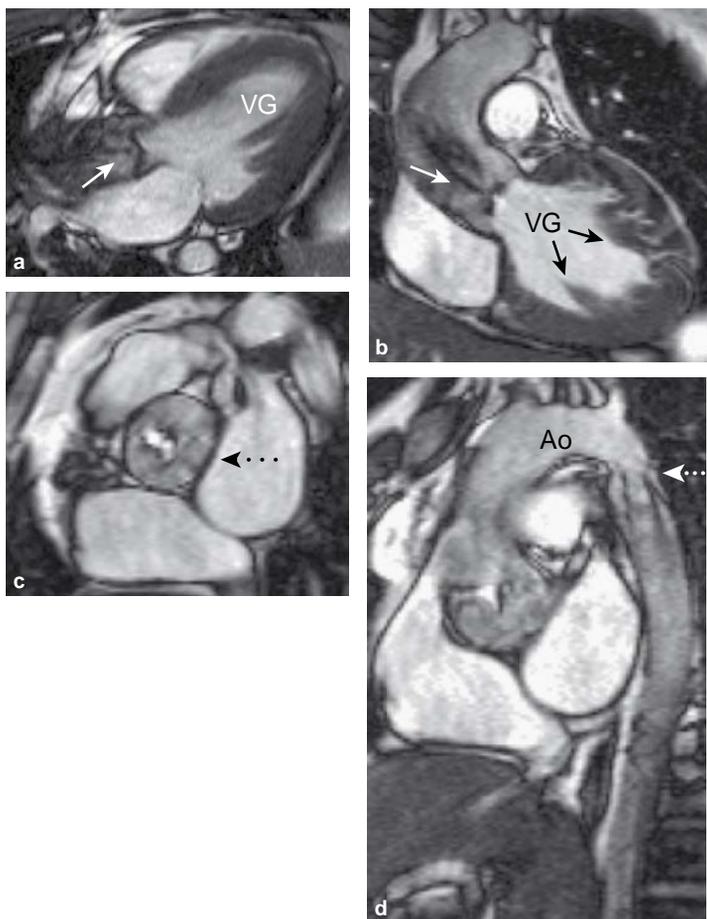


Figure 4.2 Séquence de ciné-IRM chez un homme de 34 ans porteur d'un rétrécissement aortique serré. Les coupes chambre de chasse du ventricule gauche (a,b) montrent des zones vides de signal étendues au niveau de la valve aortique (flèche blanche continue) et une hypertrophie ventriculaire gauche (flèches noires continues). La valve aortique est bicuspide (c. flèche noire discontinue) et il s'associe une coarctation de l'aorte (d. flèche blanche discontinue).

2. le niveau de sténose ;
3. la présence ou l'absence d'anomalie associée telle qu'une coarctation aortique ou une insuffisance aortique.

■ Insuffisance aortique

L'insuffisance aortique peut être provoquée par des anomalies des feuillets valvulaires, par une dilatation de l'aorte ou par une déformation de la racine aortique.

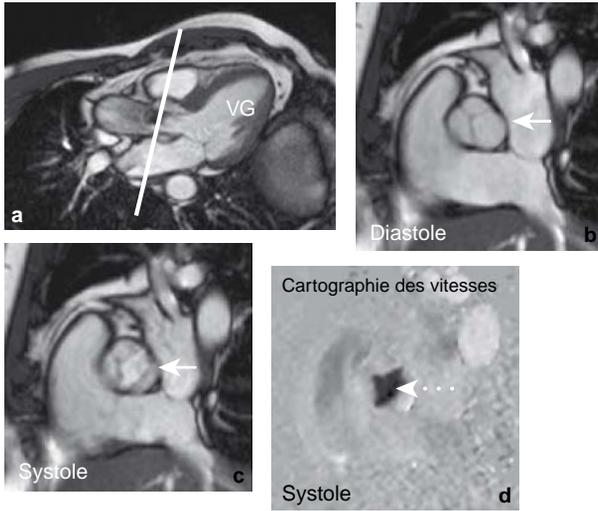


Figure 4.3 La séquence ciné-IRM dans le plan chambre de chasse du ventricule gauche (a) permet le positionnement d'un plan sagittal oblique situé juste au-delà du plan valvulaire. Dans ce plan, les coupes en diastole (b) et en systole (c) montrent la morphologie bicuspidée de la valve aortique avec une ouverture valvulaire insuffisante (flèches blanches continues). La séquence de cartographie des vitesses dans le même plan (d) permet, comme en ciné-IRM, de réaliser une évaluation planimétrique directe. La séquence de cartographie des vitesses permet également l'évaluation de la vitesse maximale transvalvulaire. Pour cela, une région d'intérêt est tracée juste au-dessus du plan valvulaire (flèche blanche discontinue). La vitesse d'éjection maximale est calculée.

Il existe également fréquemment un certain degré de régurgitation aortique en cas de sténose aortique. Les anomalies de la valve aortique peuvent être en rapport avec les modifications dégénératives d'une valve normale, avec une valve aortique bicuspidée, avec les séquelles d'une endocardite infectieuse, d'une maladie rhumatismale ou d'une valvulotomie. La dilatation de l'aorte thoracique ascendante peut être la conséquence d'une hypertension artérielle, d'une aortite (syndrome de Reiter, spondylarthrite ankylosante, artérite de Horton, polychondrite), d'une dilatation de l'anneau aortique qu'on peut observer en cas de syndrome de Marfan, d'ostéogénèse imparfaite, de syndrome d'Ehlers-Danlos, de pseudoxanthome élastique. On peut également observer une dilatation de l'aorte thoracique ascendante associée à la bicuspidie aortique. Les déformations pathologiques de la racine de l'aorte sont observées en cas de dissection aortique, de traumatisme ou d'anévrisme du sinus de Valsalva. L'insuffisance aortique provoque une augmentation de la précharge du ventricule gauche, et une augmentation de la pression télédiastolique. Cette augmentation de la pression télédiastolique est compensée par une dilatation ventriculaire et par une augmentation de la compliance ventriculaire gauche pour maintenir un débit cardiaque normal. C'est la raison pour laquelle les patients peuvent rester asymptomatiques de nombreuses années avant que l'augmentation de la pression télédiastolique ne puisse plus être compensée et que s'ensuivent une dysfonction

ventriculaire gauche ou des lésions ischémiques myocardiques. C'est la raison pour laquelle il faut détecter précocement la décompensation ventriculaire gauche afin de prévoir un remplacement aortique. La décision chirurgicale dépend de l'importance de la régurgitation aortique (estimée par les critères fonctionnels de la New York Heart Association), des valeurs de fraction d'éjection du ventricule gauche, des volumes ventriculaires gauches télédiastoliques et télésystoliques et de l'importance de la dilatation de la racine de l'aorte. Il faut noter que la fraction d'éjection ventriculaire gauche est un indicateur fiable de la gravité de la régurgitation aortique. De plus, ces mesures comme l'évaluation du volume de régurgitation avec les séquences de cartographie des vitesses sont parfaitement reproductibles.

Les coupes ciné-IRM réalisées dans le plan de la chambre de chasse du ventricule gauche permettent la visualisation du flux de régurgitation. Le flux de régurgitation doit être analysé de façon qualitative en mesurant sa surface, qui dépend cependant des caractéristiques de la séquence et notamment du temps d'écho choisi (figure 4.4a). La séquence de cartographie des vitesses est réalisée juste au-dessus du plan valvulaire, en dessous des ostiums des artères coronaires (figures 4.4b-c). Dans ce plan, les flux d'éjection et de régurgitation sont parfaitement visualisés et la morphologie valvulaire peut être correctement évaluée. La fraction de régurgitation peut être calculée par l'évaluation graphique des volumes circulatoires (figures 4.4d-e). L'aire sous la courbe des valeurs négatives représente le volume de régurgitation. La fraction de régurgitation est simplement calculée en divisant le volume de régurgitation par le volume d'éjection (figure 4.5). Une autre méthode consiste à comparer les flux d'éjection aortique et pulmonaire.

La différence entre les flux aortiques et les flux pulmonaires permet d'analyser la fraction de régurgitation, comme on pourrait le faire en comparant les volumes télédiastoliques des ventricules droits et des ventricules gauches à condition que la régurgitation aortique soit isolée. Le degré de dilatation ventriculaire constitue un marqueur supplémentaire permettant une analyse qualitative de la sévérité de la régurgitation. En cas de dilatation ventriculaire gauche, il est important de réaliser des séquences tardives après injection de produit de contraste pour chercher des lésions de fibrose myocardique, notamment en préopératoire.

L'insuffisance aortique est classée en fonction de l'importance de la fraction de régurgitation, minime : < 30 %, minime à modérée : 30 à 39 %, modérée à sévère : 40 à 49 %, sévère > 50 %. Les points spécifiques à aborder pour le compte rendu d'une insuffisance aortique sont :

1. l'évaluation de la sévérité de la régurgitation aortique (surface de régurgitation, fraction d'éjection ventriculaire gauche, volume ventriculaire gauche télésystolique et télédiastolique et fraction de régurgitation);
2. les dimensions de l'aorte mesurée au niveau de l'anneau aortique, des sinus de Valsalva, de la jonction sinotubulaire, de l'aorte thoracique ascendante au niveau de la bifurcation de l'artère pulmonaire, au niveau de la crosse de l'aorte et au niveau de l'aorte thoracique descendante;
3. l'étiologie de l'insuffisance aortique et les anomalies associées, comme une dissection aortique ou une sténose aortique.

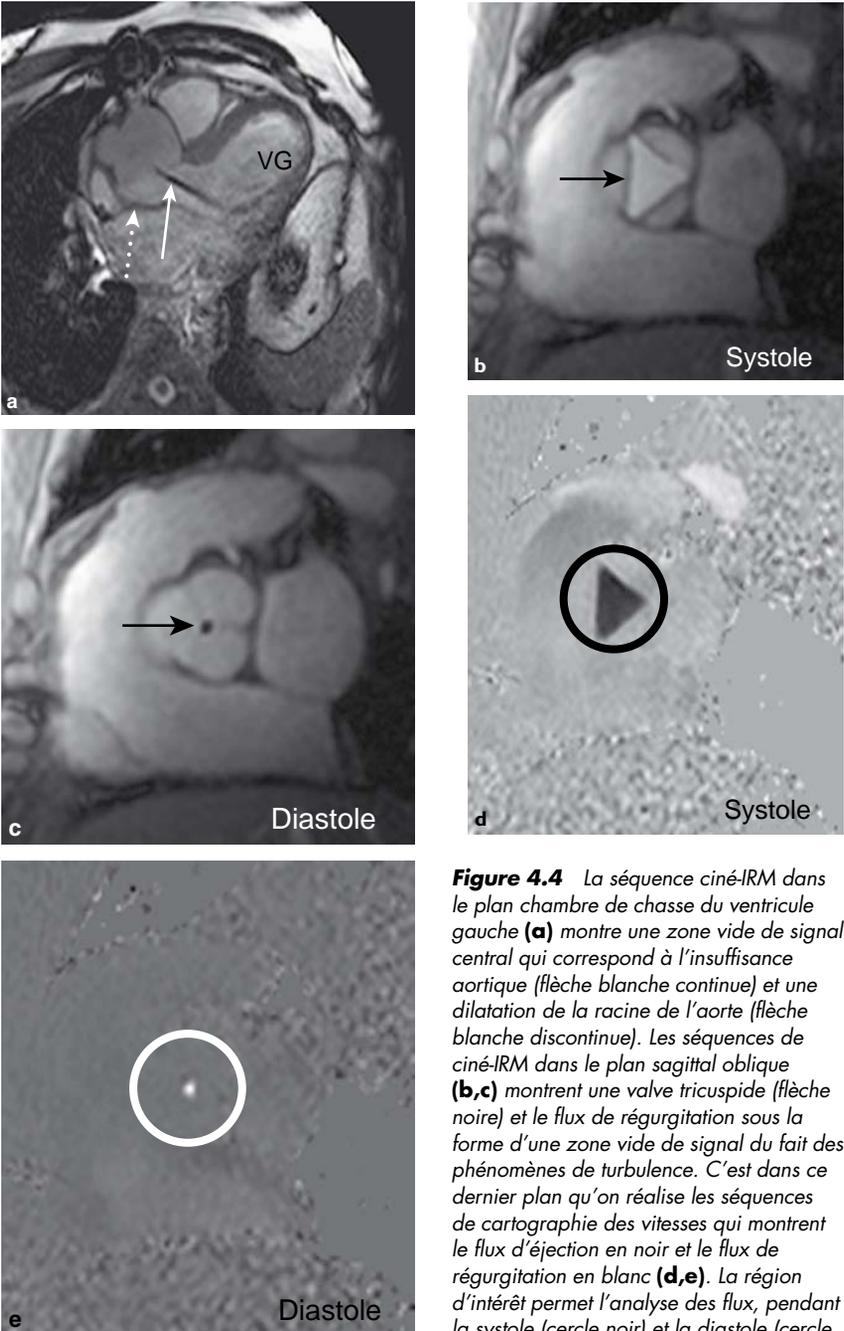


Figure 4.4 La séquence ciné-IRM dans le plan chambre de chasse du ventricule gauche (a) montre une zone vide de signal central qui correspond à l'insuffisance aortique (flèche blanche continue) et une dilatation de la racine de l'aorte (flèche blanche discontinue). Les séquences de ciné-IRM dans le plan sagittal oblique (b,c) montrent une valve tricuspide (flèche noire) et le flux de régurgitation sous la forme d'une zone vide de signal du fait des phénomènes de turbulence. C'est dans ce dernier plan qu'on réalise les séquences de cartographie des vitesses qui montrent le flux d'éjection en noir et le flux de régurgitation en blanc (d,e). La région d'intérêt permet l'analyse des flux, pendant la systole (cercle noir) et la diastole (cercle blanc). L'analyse sur logiciel dédié permet de calculer la fraction de régurgitation.

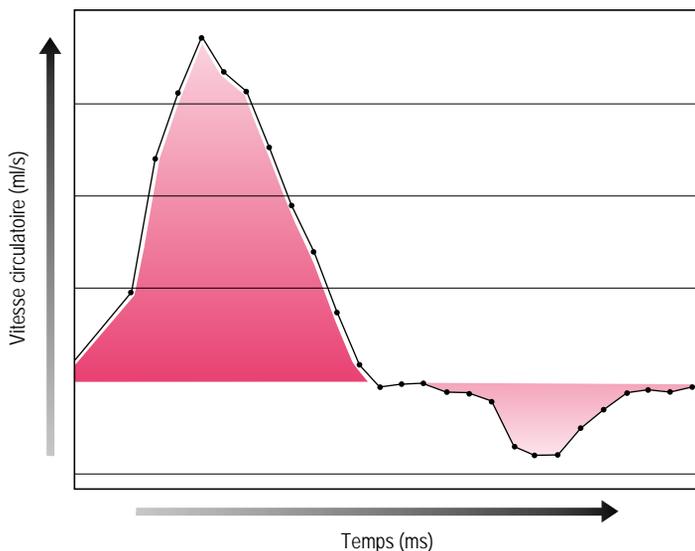


Figure 4.5 Représentation des résultats de la séquence de cartographie des vitesses à partir du cas montré en figure 4.4. La fraction de régurgitation (volume de régurgitation/volume d'éjection) est calculée par un logiciel dédié en divisant le volume de régurgitation en diastole (rouge clair) par le volume d'éjection systolique (rouge foncé). Dans ce cas, la fraction de régurgitation est estimée à 20 %, ce qui correspond à une insuffisance aortique minime.

■ Rétrécissement mitral

C'est le rhumatisme articulaire aigu qui constitue la cause la plus fréquente de rétrécissement mitral. Plus rarement, le rétrécissement mitral peut être en rapport avec une sténose congénitale valvulaire, sous-valvulaire ou sus-valvulaire, par une infiltration amyloïde ou carinoïde des feuillets valvulaires, par des calcifications valvulaires ou par un myxome de l'oreillette gauche. La sténose valvulaire se traduit par un gradient de pression transmitral, à l'origine d'une augmentation de la pression auriculaire gauche. L'hyperpression auriculaire gauche provoque une hypertension veineuse pulmonaire qui peut évoluer vers une hypertension artérielle pulmonaire, ou une insuffisance ventriculaire droite. L'IRM cardiaque complète l'échocardiographie, notamment chez les patients difficiles à explorer. Les coupes ciné-IRM réalisées dans les plans quatre cavités, deux cavités et chambre de chasse du ventricule gauche montrent l'épaississement, la restriction et la ballonisation des feuillets valvulaires ainsi qu'une zone vide de signal traduisant la sténose mitrale qui vient occuper le ventricule gauche pendant la diastole (figure 4.6). On visualise une dilatation de l'oreillette gauche en cas de sténose mitrale modérée ou sévère. En cas d'hypertension artérielle pulmonaire, il existe aussi une dilatation du tronc de l'artère pulmonaire et une régurgitation tricuspide. On peut également réaliser une acquisition dans le plan chambre de chasse du ventricule droit. Des séquences de ciné-IRM et de cartographie

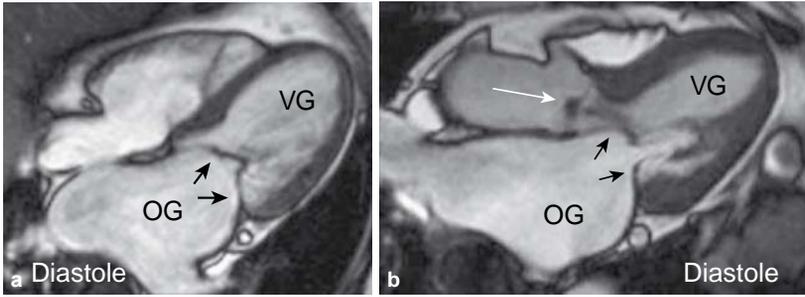


Figure 4.6 Séquence de ciné-IRM chez un patient porteur d'une sténose mitrale rhumatismale. Les feuillets valvulaires mitraux sont épaissis. L'ouverture valvulaire est limitée et on visualise des turbulences lors de la vidange de l'oreillette gauche (flèches noires) et une dilatation de l'oreillette gauche. Les feuillets valvulaires aortiques sont également épaissis et il existe une insuffisance aortique associée (b. flèche blanche).

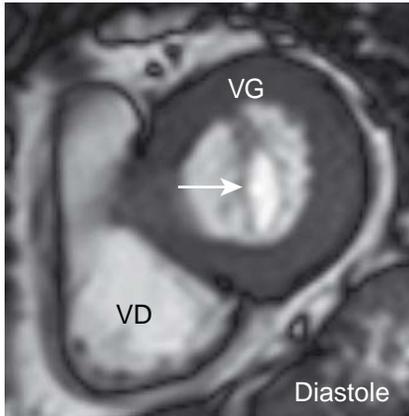


Figure 4.7 Séquence de ciné-IRM acquise dans un plan parallèle au plan valvulaire mitral (flèche blanche) chez le même patient. L'analyse planimétrique retrouve une surface valvulaire de $1,8 \text{ cm}^2$.

des vitesses peuvent être réalisées dans un plan parallèle au plan valvulaire mitral, afin de réaliser une évaluation planimétrique de la sténose mitrale (figure 4.7). Cette évaluation planimétrique est rendue plus difficile du fait du mouvement du plan valvulaire au cours du cycle cardiaque. La planimétrie de la surface valvulaire est correctement corrélée avec les résultats échocardiographiques et les résultats du cathétérisme. Les résultats obtenus peuvent cependant être un peu surestimés.

La séquence de cartographie des vitesses permet de calculer le gradient de pression transvalvulaire en se servant de l'équation de Bernoulli modifiée, en programmant une acquisition dans le plan (*in plane*) ou, mieux, à travers le plan (*through plane*), juste au-delà du plan valvulaire. Il faut savoir que le gradient transvalvulaire

peut être surestimé. On se sert d'une vitesse d'encodage maximale inférieure à celle utilisée pour les rétrécissements aortiques, de l'ordre de 1,5 m/s.

La gravité de la sténose mitrale est évaluée en : minime : $\geq 1,5 \text{ cm}^2$; modérée : 1,0 à $1,5 \text{ cm}^2$; sévère : $< 1 \text{ cm}^2$.

Les points spécifiques à aborder dans le compte rendu sont :

1. l'évaluation de la gravité (planimétrie valvulaire, gradient transvalvulaire) ;
2. l'existence d'une hypertension artérielle pulmonaire ;
3. l'existence de lésions associées : insuffisance mitrale, atteinte de la valve aortique.

■ Insuffisance mitrale

L'insuffisance mitrale peut être provoquée par des anomalies des feuillets valvulaires mitraux (dégénérescence myxoïde [figure 4.8], rhumatisme articulaire aigu, endocardite, ballonnisation des feuillets), des lésions des cordages (dégénératives, rupture traumatique d'un cordage, endocardite), des lésions des piliers (infarctus du myocarde) ou de l'anneau mitral (dilatation annulaire, calcification périannulaire). L'insuffisance mitrale est à l'origine d'une dilatation auriculaire gauche et d'une dilatation ventriculaire gauche par augmentation de la précharge. Une hypertension veineuse pulmonaire peut également être observée. Elle est généralement moins sévère qu'en cas de sténose mitrale. C'est la raison pour laquelle l'hypertension artérielle pulmonaire est rare.

L'insuffisance mitrale aiguë peut provoquer une hypertension veineuse pulmonaire qui peut être asymétrique (lobe supérieur droit) sans dilatation auriculaire

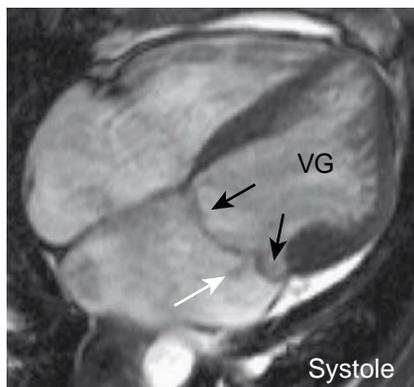


Figure 4.8 Séquence ciné-IRM en quatre cavités chez une femme de 40 ans porteuse d'un prolapsus valvulaire mitral familial. Le prolapsus valvulaire mitral est provoqué par des lésions dégénératives des feuillets valvulaires et des cordages. À leur partie moyenne, les feuillets valvulaires sont prolapsés en arrière du plan de l'anneau pendant la systole, mais l'extrémité des feuillets valvulaires ne passe pas en arrière du plan valvulaire (flèches noires). Il existe une régurgitation mitrale minime dans ce cas (flèche blanche).

ou ventriculaire. L'IRM cardiaque est utile pour évaluer la gravité de l'insuffisance mitrale, chercher des signes de décompensation, évaluer l'efficacité des traitements et prévoir un éventuel remplacement valvulaire chirurgical. L'IRM cardiaque cherche une diminution de la fraction d'éjection (inférieure à 50 %) et une augmentation du diamètre téléstolique supérieure à 5,0–5,5 cm. En cas de dilatation ventriculaire gauche, il est important de réaliser des coupes tardives après injection pour chercher des lésions ischémiques.

Les coupes ciné-IRM en quatre cavités, deux cavités et chambre de chasse du ventricule gauche montrent la zone vide de signal en rapport avec le jet de régurgitation. Ce jet de régurgitation est central en cas de dilatation annulaire, excentrique en cas d'anomalie des feuillets valvulaires, des cordages ou des piliers. On peut observer des jets de régurgitation complexes ou multiples (figure 4.9). L'insuffisance mitrale peut être évaluée de façon qualitative en évaluant l'aire de la zone vide de signal (qui dépend des caractéristiques de la séquence et notamment du temps d'écho) et le degré de dilatation auriculaire gauche. Des méthodes quantitatives d'évaluation de la fraction de régurgitation peuvent être réalisées comme pour l'insuffisance aortique. Lorsque l'insuffisance mitrale se traduit par un jet de régurgitation simple central, on peut réaliser une séquence des cartographies des vitesses en programmant un plan de coupe parallèle au plan valvulaire. C'est dans ce plan qu'on peut également réaliser une évaluation planimétrique de l'orifice de régurgitation. On peut aussi évaluer la fraction de régurgitation en mesurant la différence du volume ventriculaire gauche téléstolique et du volume ventriculaire droit téléstolique, à la condition que l'atteinte valvulaire mitrale soit isolée.

La sévérité de l'insuffisance mitrale est quantifiée en fonction de la fraction de régurgitation : minime : < 30 % ; minime à modérée : 30–39 % ; modérée à sévère : 40–49 % ; sévère : > 49 %.

Les points spécifiques à traiter dans le compte rendu sont :

1. l'évaluation de la gravité de l'insuffisance mitrale (caractéristique du jet de régurgitation, fraction d'éjection ventriculaire gauche, volume ventriculaire gauche téléstolique, volume ventriculaire gauche télédiastolique et fraction de régurgitation) ;
2. présence d'une hypertension veineuse pulmonaire et d'une hypertension artérielle pulmonaire ;
3. étiologie de l'insuffisance mitrale et lésions valvulaires associées.

■ Autres valvulopathies

Les atteintes polyvalvulaires sont fréquentes, notamment dans les suites d'un rhumatisme articulaire aigu qui intéresse le plus souvent la valve mitrale, mais également la valve aortique. Au cours de l'évolution des valvulopathies, une hypertension artérielle pulmonaire peut être observée et peut être à l'origine d'une insuffisance tricuspide. En cas de polyvalvulopathie, l'évaluation des fractions de régurgitation en IRM cardiaque est plus compliquée. Elle reste possible en se servant de séquences

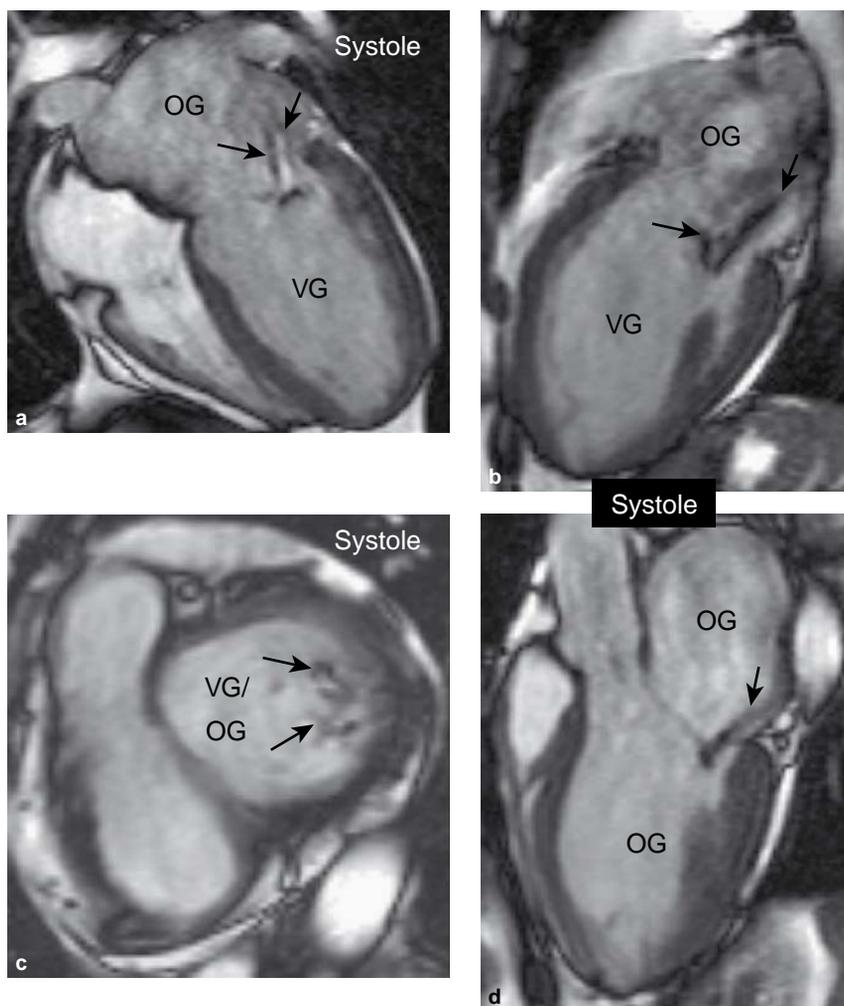


Figure 4.9 a. Incidence quatre cavités. b. Incidence deux cavités. c. Incidence petit axe basal. d. Incidence chambre de chasse du ventricule gauche chez une femme de 44 ans présentant une insuffisance mitrale complexe à l'origine de plusieurs jets excentriques (flèches noires). La fraction d'éjection ventriculaire gauche est de 47 % et la fraction de régurgitation calculée par la comparaison des volumes télésystoliques du ventricule gauche et du ventricule droit est de 60 %, témoignant d'une insuffisance mitrale sévère. Pas d'anomalie de rehaussement sur la séquence tardive après injection.

de cartographies des vitesses. On peut également réaliser des évaluations planimétriques des valves aortiques et mitrales (tableau 4.1). Comme en échocardiographie, l'évaluation doit prendre en compte l'ensemble des index.

L'IRM cardiaque peut également être utilisée pour quantifier les insuffisances tricuspides, les insuffisances pulmonaires et les sténoses pulmonaires. La capacité

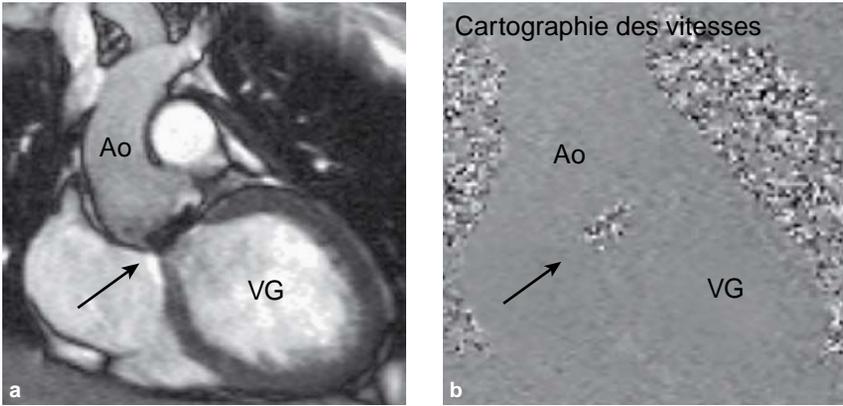


Figure 4.10 Incidence chambre de chasse du ventricule gauche, en ciné-IRM (a) et en cartographie des vitesses (b), chez une femme de 27 ans qui présente une dilatation de l'aorte thoracique initiale après un remplacement valvulaire aortique (prothèse Medtronic Hall, 21 mm) 12 ans auparavant.

La zone vide de signal provoquée par la valve aortique métallique est bien visualisée sur les deux séquences, mais ces artéfacts ne gênent pas l'analyse de la fonction valvulaire (flèches noires).

Tableau 4.1 Évaluation de l'importance de la régurgitation par l'analyse de l'orifice de régurgitation (mm²)

Gravité	Insuffisance mitrale	Insuffisance aortique
Minime	< 20	< 10
Minime à modérée	20–29	10–19
Modérée à sévère	30–39	20–29
Sévère	> 40	> 30

tridimensionnelle peut être exploitée pour l'évaluation de la fonction ventriculaire droite globale, ce qui est difficile en échocardiographie.

Les prothèses valvulaires peuvent être analysées en IRM cardiaque, mais en cas de prothèse métallique, l'analyse d'éventuels abcès paravalvulaires et l'analyse des fractions de régurgitation peuvent être gênées par les artéfacts métalliques (figure 4.10). Les séquences en écho de spin rapide sont moins artéfactées en cas de prothèse métallique que les séquences de ciné-IRM ou que les séquences de cartographies des vitesses.

■ Indications

L'IRM cardiaque peut :

1. réaliser une évaluation de bonne qualité, notamment chez les patients difficiles à évaluer en échocardiographie. Cela étant dit, l'évaluation en

- IRM cardiaque peut être rendue difficile en cas d'arythmie cardiaque (la fibrillation auriculaire est moins gênante que le bigéminisme ventriculaire) et en cas de valve mécanique, même si l'évaluation reste possible ;
2. constituer une méthode d'évaluation supplémentaire en cas de discordance entre les résultats de l'échocardiographie et ceux du cathétérisme cardiaque ;
 3. évaluer les conséquences des valvulopathies sur la morphologie cardiovasculaire ainsi que sur la fonction cardiaque et servir de modalité de surveillance ;
 4. réaliser une évaluation de bonne qualité des valvulopathies droites et de la fonction ventriculaire droite.

En revanche, l'IRM cardiaque ne peut pas :

1. remplacer l'échocardiographie. L'échocardiographie constitue aujourd'hui l'imagerie de référence pour l'évaluation initiale de patients porteurs de valvulopathie ;
2. visualiser les petites végétations valvulaires observées en cas d'endocardite.

Masses cardiaques, péricardites et myocardites

Anitha Varghese, Ping Chai

■ Introduction

La détection et la caractérisation des masses cardiaques et péricardiques constituent une indication de classe I en IRM cardiaque.

L'IRM cardiaque, dans le cadre des péricardites constrictives et des épanchements péricardiques, constitue des indications de classe II et de classe III. L'IRM cardiaque est en cours d'évaluation pour l'étude des myocardites.

■ Masses cardiaques

Le protocole utilisé pour l'évaluation des masses cardiaques doit être en mesure de répondre aux questions suivantes :

1. l'analyse anatomique : l'IRM cardiaque est apte à préciser la taille, l'extension, les rapports anatomiques de la masse aux structures voisines, dans les trois dimensions de l'espace, en se servant d'images en haute résolution ;
2. l'analyse de la fonction cardiaque ;
3. la caractérisation tissulaire peut se faire à l'aide de séquences d'écho de spin, d'écho de gradient, en se servant de séquences avec suppression de la graisse et de coupes précoces et tardives après injection de gadolinium.

■ Thrombus

Les thrombus constituent les masses cardiaques de loin les plus fréquentes. Ces thrombus, qu'ils soient auriculaires ou ventriculaires, sont facilement visualisés en IRM en se servant de séquences d'écho de spin, d'écho de gradient ou de séquences après injection de gadolinium (figure 5.1). Sur les séquences d'écho de spin pondérées

en T1, le thrombus a généralement un signal intermédiaire, un peu supérieur à celui du myocarde et du sang. Sur les séquences d'écho de spin pondérées en T2, le thrombus est généralement entouré d'un liséré de flux lent à l'origine d'un signal plus élevé que celui du thrombus, et qui permet de bien différencier le thrombus du myocarde de voisinage. Avec les séquences ciné-IRM et de cartographie des vitesses, le thrombus a un signal beaucoup plus bas que celui du flux sanguin. L'injection de gadolinium augmente encore la sensibilité de la méthode en montrant une lésion non rehaussée par l'injection de produit de contraste sur les séquences précoces comme sur les séquences tardives. En cas de thrombus ventriculaire gauche, il est habituel de visualiser sur les séquences tardives une zone d'infarctissement myocardique en regard du thrombus. C'est effectivement très fréquemment au voisinage d'une zone

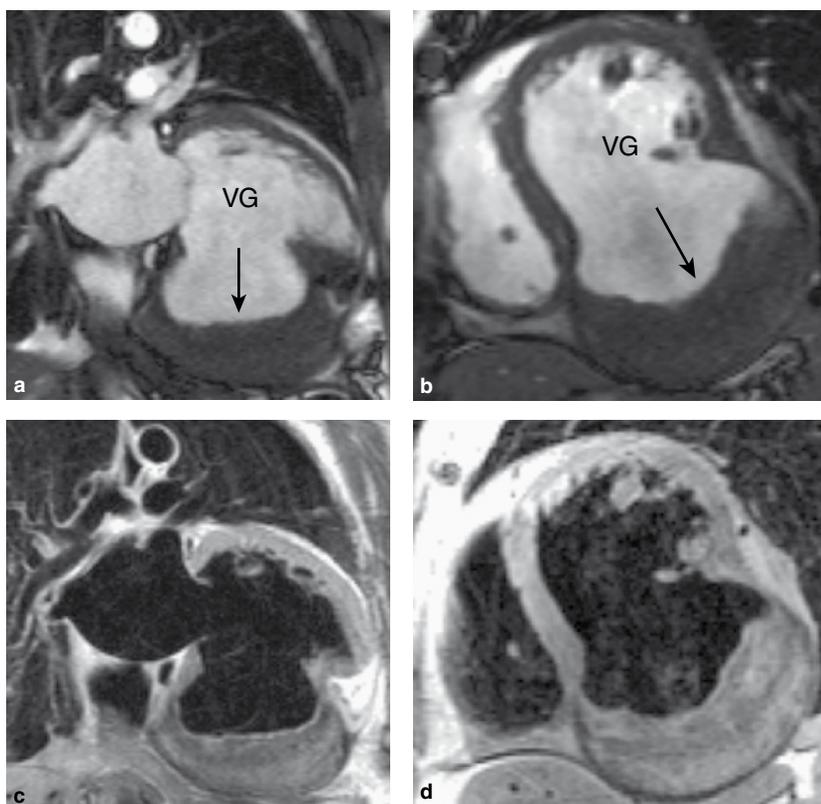


Figure 5.1 Volumineux pseudoanévrisme ventriculaire gauche inférieur et thrombus marginé (flèche noire) chez une femme de 70 ans ayant des antécédents d'infarctus du myocarde. La coupe deux cavités (a) et la coupe petit axe médioventriculaire (b) en mode ciné-IRM montrent que le thrombus a un signal beaucoup plus bas que celui du flux sanguin de voisinage. Les coupes correspondantes en deux cavités (c) et en petit axe (d) en écho de spin pondérées en T2 montrent que le signal du thrombus est hétérogène du fait de l'existence de plusieurs couches contenant des produits de dégradation de l'hémoglobine.

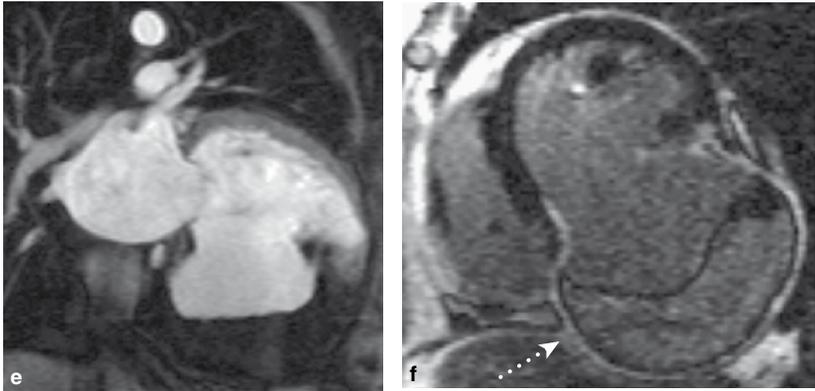


Figure 5.1 (suite) Il existe sur la coupe deux cavités réalisée précocement après injection **(e)** une lacune marginée au contact de la zone infarctée qui est bien visualisée sur la coupe tardive **(f)**. ligne blanche discontinue).

akinétique ischémique que le thrombus s'est développé. En cas de thrombus auriculaire, on visualise souvent une dilatation de l'oreillette gauche et de l'auricule gauche, comme en échographie cardiaque transthoracique.

Tumeurs

Les tumeurs cardiaques secondaires sont plus fréquentes que les tumeurs cardiaques primitives. Dans les deux cas, leur incidence est rare, avec une fréquence de découverte autopsique de 1 % et de 0,05 % respectivement. L'envahissement cardiaque de voisinage est généralement asymptomatique et limité à la couche épicaudique. Quand il existe un retentissement clinique, c'est le plus souvent la traduction d'un épanchement péricardique de grande abondance avec des signes en rapport avec une tamponnade, des troubles du rythme, une cardiomégalie ou une insuffisance cardiaque. Des lésions de voisinage, comme le cancer bronchique primitif, le cancer du sein ou l'adénocarcinome rénal, peuvent atteindre l'oreillette droite (figure 5.2). Les métastases cardiaques sont généralement la conséquence de mélanome malin, de leucémie ou de lymphome.

La majorité des tumeurs cardiaques primitives sont bénignes, les plus fréquentes étant des myxomes auriculaires (45 % des cas) et des lipomes cardiaques (20 % des cas) [figure 5.3]. Les tumeurs malignes constituent environ un quart des tumeurs cardiaques. Dans l'immense majorité des cas, il s'agit de sarcome (95 % des cas). L'évaluation anatomique en IRM cardiaque de l'extension intra- et extracardiaque a d'évidentes implications en matière de bilan d'extension, de traitement chirurgical et de surveillance (figure 5.4). En IRM cardiaque, la différenciation entre les tumeurs malignes et les tumeurs bénignes se sert de principes généraux communs aux autres méthodes d'imagerie et de signes plus spécifiques. D'une manière générale, la malignité est plus fréquente en cas de volumineuse tumeur ayant une base d'implantation

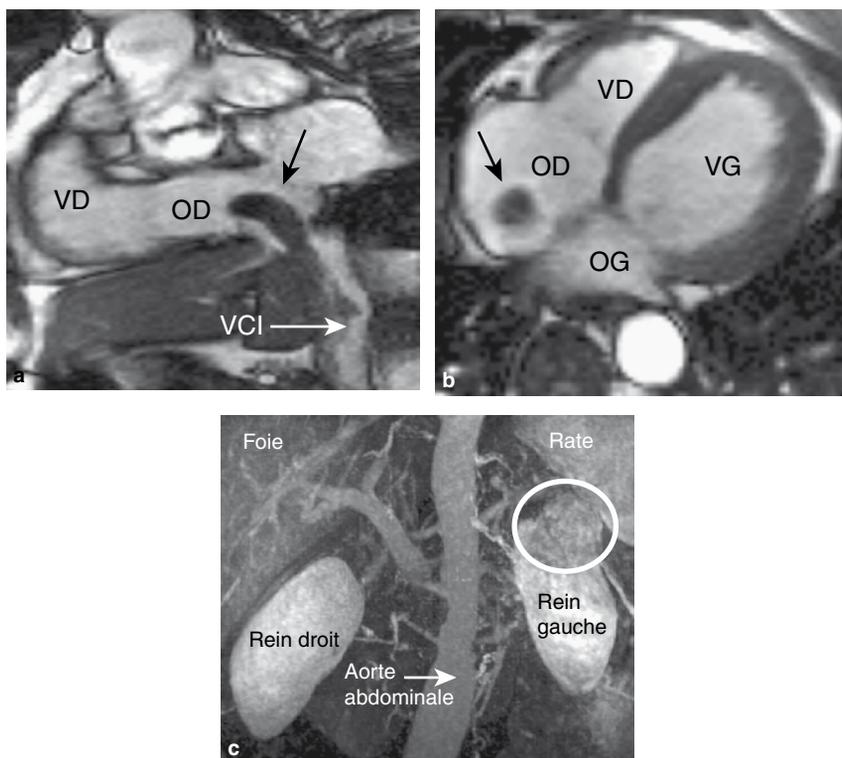


Figure 5.2 IRM cardiaque d'un homme de 63 ans atteint d'un adénocarcinome rénal gauche. La séquence de ciné-IRM de l'oreillette droite (a) montre l'extension de la tumeur (flèche blanche) par l'intermédiaire de la veine cave inférieure. La séquence de ciné-IRM dans le plan transversal (b) confirme l'existence de l'extension tumorale au sein de l'oreillette droite (flèche noire). La séquence d'angiographie par résonance magnétique (c) montre une volumineuse masse (5,5 × 4,0 × 4,5 cm) du pôle supérieur du rein gauche (cercle blanc).

large intéressant plusieurs cavités cardiaques ou les troncs supra-aortiques, et caractérisée par une atteinte péricardique ou extracardiaque associée. Plus spécifiquement, on se sert des capacités du contraste spontané de bonne qualité en T1 et en T2 pour aider à la caractérisation des masses. L'existence d'un hypersignal sur les séquences pondérées en T1 peut être la traduction de lésions kystiques présentant une concentration protéique élevée, de tumeurs graisseuses (lipome, liposarcome), de remaniements hémorragiques récents ou de mélanome. L'existence d'un hyposignal sur les séquences pondérées en T1 est généralement observée dans les lésions kystiques, au sein des malformations vasculaires, en cas de lésion calcifiée, ou lorsqu'une masse présente un contingent aérien.

Sur les séquences pondérées en T2, les lésions kystiques sont à l'origine d'un signal élevé, non diminué après suppression de la graisse. Les séquences de perfusion

précoces sont aptes à démontrer le rehaussement des tumeurs hypervasculaires (hémangiome, angiosarcome) et permettent parfois la visualisation directe des vaisseaux tumoraux. Sur les séquences tardives, les lésions tumorales sont généralement à l'origine d'un hyposignal avec des zones rehaussées en rapport avec des lésions de nécrose ou de fibrose, avec prise de contraste au sein de l'espace interstitiel (figure 5.5). On ne met pas en évidence de rehaussement dans les lésions kystiques et dans la

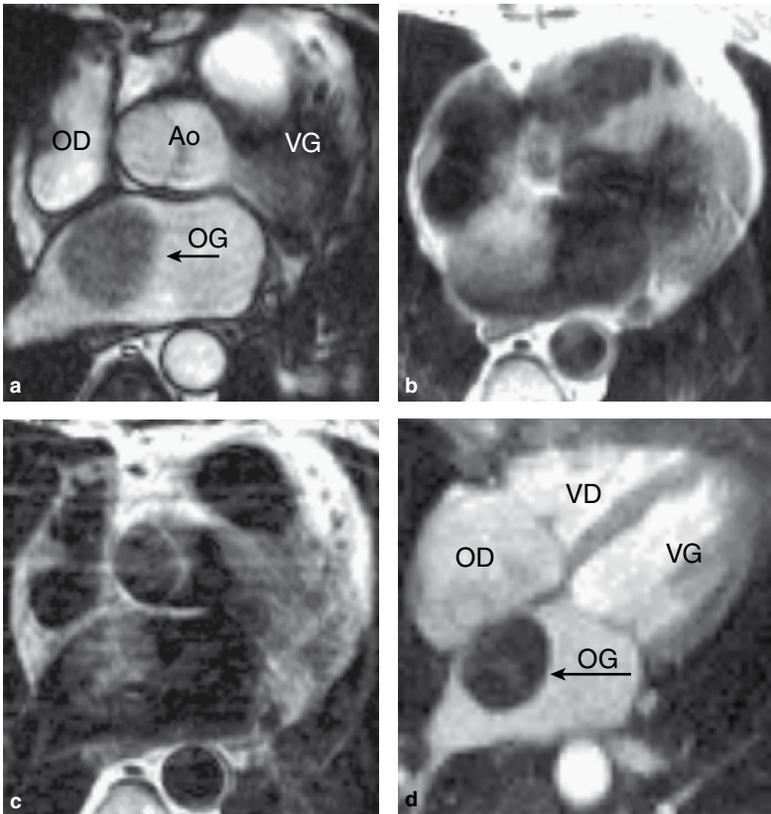


Figure 5.3 Myxome de l'oreillette gauche (flèches noires) chez un homme de 65 ans chez lequel une masse auriculaire gauche a été découverte en échographie cardiaque transthoracique et transœsophagienne. **a.** La coupe ciné-IRM dans le plan transversal montre une masse ovoïde mesurant $4,2 \times 3,8 \times 4,0$ cm au sein de l'oreillette gauche. La base d'implantation est située au niveau de la cloison interauriculaire et le myxome est à l'origine d'un signal inférieur à celui du sang de voisinage. **b.** La séquence d'écho de spin pondérée en T1 dans le même plan montre une lésion de signal intermédiaire, présentant une portion centrale à l'origine d'un hypersignal en rapport avec des remaniements hémorragiques. **c.** L'image pondérée en T2 montre que la masse est globalement en hyposignal. **d.** La coupe quatre cavités réalisée après injection de produit de contraste montre une petite zone de rehaussement central compatible avec une hypervasularisation centrale.

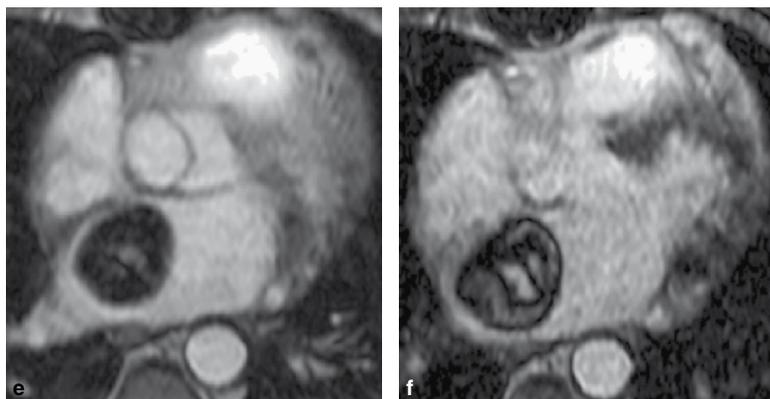


Figure 5.3 (suite) e. Sur les temps d'injection plus tardifs, le rehaussement central est plus net. f. Sur les coupes tardives, il existe un rehaussement net qui est probablement la traduction de nécrose ou de fibrose.

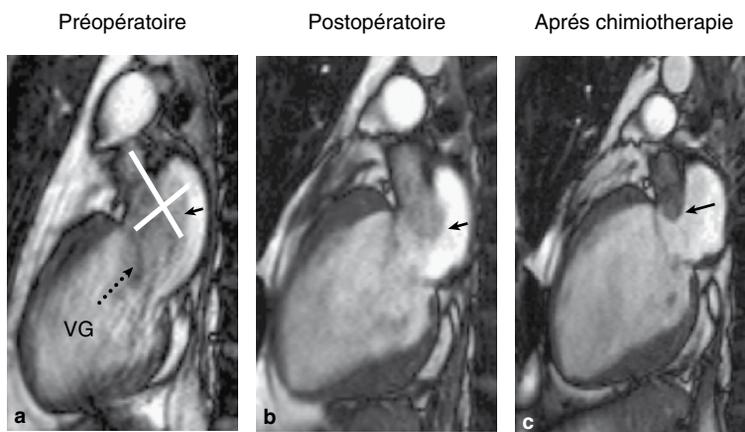


Figure 5.4 Différents examens successifs réalisés chez un homme de 44 ans présentant un sarcome de l'oreillette gauche avant et après traitement dans un plan de coupe deux cavités en ciné-IRM (a-c. flèches noires continues). L'IRM est utilisée pour analyser les dimensions tumorales (a. lignes blanches) et la fonction valvulaire mitrale (a. flèche noire discontinue).

majorité des tumeurs bénignes avec les exceptions des hémangiomes, des myxomes et des fibromes (figure 5.6).

■ Atteintes péricardiques

Le péricarde est constitué d'un sac présentant un feuillet viscéral et un feuillet pariétal qui entourent le cœur et l'origine des troncs supra-aortiques. Le feuillet interne est

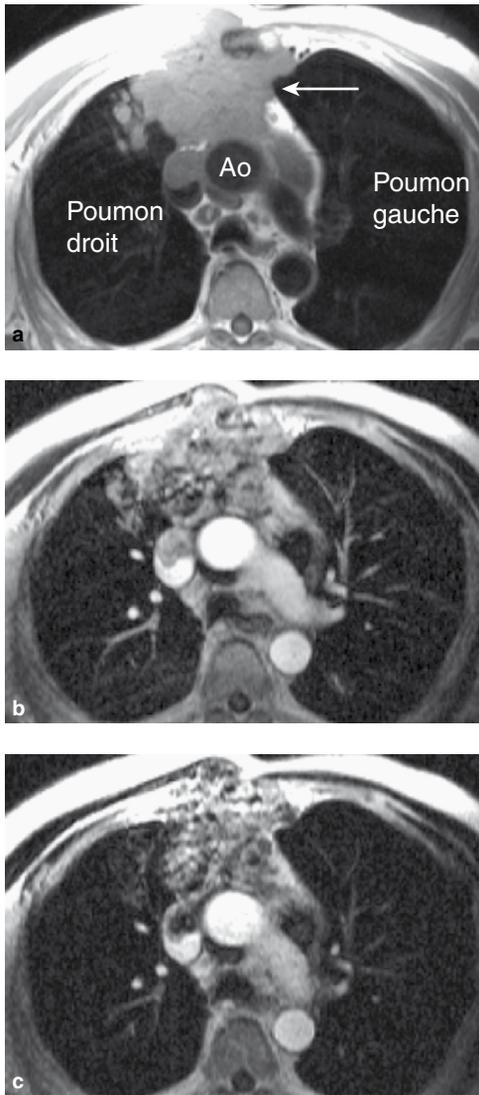


Figure 5.5 IRM cardiaque d'un homme de 82 ans chez lequel un épanchement péricardique et des anomalies de la fonction diastolique ont été mis en évidence en échographie transthoracique. **a.** La coupe transversale pondérée en T1 montre une volumineuse masse médiastinale antérieure, mal limitée, lobulée (flèche blanche), envahissant le sternum et la paroi thoracique antérieure en avant et le péricarde en arrière. **b.** Après injection, la masse est rehaussée de façon hétérogène. **c.** Sur les séquences tardives, il existe un rehaussement hétérogène. Ces signes sont évocateurs d'une tumeur maligne, telle qu'un lymphome, un angiosarcome ou un carcinome thymique.

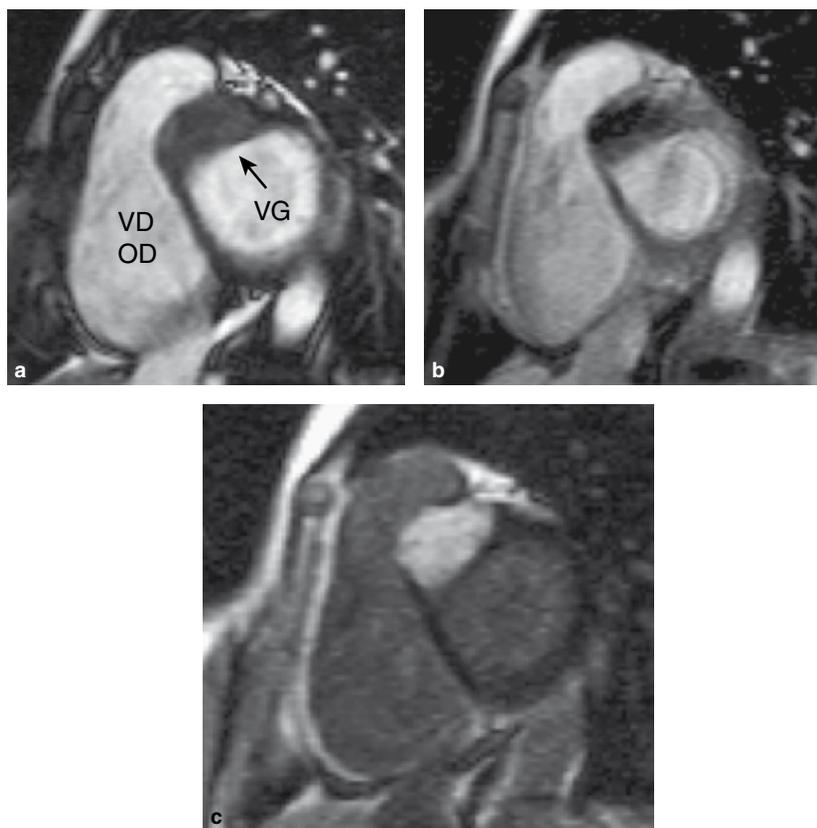


Figure 5.6 Coupe petit axe basale d'une femme de 32 ans adressée en IRM cardiaque après la découverte en échocardiographie d'une hypertrophie localisée antéroseptobasale et biopsie myocardique négative. La coupe en mode ciné-IRM confirme les anomalies échographiques (**a.** flèche noire). Il n'existe pas de rehaussement sur les coupes réalisées précocement après injection de produit de contraste. **b.** Au contraire, la masse est très nettement rehaussée sur les coupes tardives (**c**). En IRM cardiaque, ces signes sont caractéristiques du diagnostic de fibrome myocardique.

adhérent au myocarde, constituant en cela le feuillet viscéral ou épiqueurdu du péricarde, et s'étend sur l'origine des troncs supra-aortiques pour effectuer une réflexion et devenir le feuillet externe du péricarde. Ce feuillet externe est fibreux, on parle de « feuillet pariétal » dont les prolongements sont fixés au diaphragme, au sternum, aux cartilages costaux et au rachis. Les deux feuillets péricardiques sont séparés par un espace contenant 15 à 35 ml d'un liquide séreux. Ainsi, l'épaisseur péricardique globale est de 1 à 2 mm. À la base du cœur, les réflexions péricardiques constituent des sinus et des récessus. Il faut notamment savoir reconnaître le récessus aortique supérieur, qui ne doit pas être confondu avec un flap en rapport avec une dissection aortique (voir la figure 10.10). Le péricarde est généralement bien visualisé, contrasté

par la couche graisseuse épiscopardique et la couche graisseuse médiastinale. Un artéfact de bord en IRM cardiaque explique que l'épaisseur péricardique puisse être mesurée jusqu'à 4 mm. Le péricarde normal est à l'origine d'un signal faible sur les séquences d'écho de spin et sur les séquences d'écho de gradient (figure 5.7). Mais il faut savoir distinguer ces feuilletés péricardiques d'un liséré noir visible à l'interface du myocarde et de la graisse épiscopardique sur les séquences en écho de gradient en rapport avec un artéfact de déplacement chimique (voir, dans le chapitre 10 : « Artéfacts de déplacement chimique »).

Le péricarde a un rôle de protection de la masse myocardique et il intervient également dans l'hémodynamique des remplissages auriculaire et ventriculaire. Du fait des contraintes péricardiques, le volume total des quatre cavités cardiaques est limité. C'est la raison pour laquelle des modifications de volume d'une cavité cardiaque ont pour résultat des modifications de volume des autres cavités cardiaques. Lorsqu'il existe une augmentation de la pression intrapéricardique comme en cas d'épanchement péricardique ou de péricardite constructive, l'interdépendance des remplissages des deux ventricules est aggravée. La pression intrapéricardique, est généralement du même ordre que la pression intrapleurale. C'est la raison pour laquelle, lors de l'inspiration, il existe une petite augmentation physiologique du remplissage cardiaque droit et une petite diminution du remplissage ventriculaire gauche. En cas de pathologie péricardique, ces modifications respiratoires affectant les remplissages ventriculaires sont plus marquées.

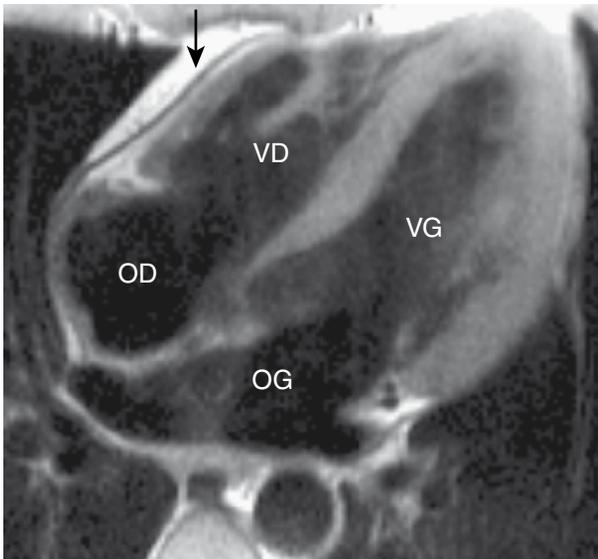


Figure 5.7 La séquence en écho de spin pondérée en T1 dans le plan quatre cavités montre l'aspect du péricarde normal en avant du ventricule droit (flèche noire).

Péricardite aiguë et épanchement péricardique

La péricardite aiguë peut se traduire par des signes et des symptômes d'insuffisance cardiaque, et des troubles du rythme s'il existe une myocardite associée.

Les signes en IRM cardiaque sont très variables. Ils peuvent être absents ou au contraire se présenter sous la forme d'anomalies contractiles localisées, d'un épaissement péricardique et d'un épanchement péricardique. Il faut étudier le cœur dans les trois plans de l'espace afin d'évaluer correctement l'abondance de l'épanchement, notamment s'il est enkysté. Un épanchement inférieur à 10 mm d'épaisseur est considéré comme un épanchement de petite abondance, alors que les épanchements de grande abondance ont une épaisseur supérieure à 20 mm. L'épanchement péricardique est à l'origine d'un hyposignal sur les séquences pondérées en T1 et d'un hypersignal sur les séquences d'écho de gradient (figure 5.8). En cas de remaniement hémorragique, le signal dépend de l'ancienneté de l'hémorragie. Au stade aigu, il existe un hypersignal sur les séquences pondérées en T1 et un hyposignal sur les séquences en écho de gradient, alors que les hémopéricardes chroniques sont à l'origine d'un signal hétérogène sur les séquences en écho de spin. Les séquences pondérées en T1 permettent de différencier les transsudats des exsudats et des épanchements chyleux. Les transsudats sont caractérisés par un hyposignal, alors que les épanchements chyleux sont à l'origine d'un hypersignal, les exsudats ayant un signal intermédiaire. Les séquences en mode ciné-IRM montrent une diminution de la taille des cavités cardiaques pendant la diastole, des anomalies du déplacement du septum interventriculaire en cas de tamponnade cardiaque. En cas de tamponnade, on peut également observer un mouvement de balancement du cœur au sein de l'épanchement. Les autres anomalies sont constituées par une dilatation des veines caves supérieure et inférieure et par des anomalies médiastinales et pulmonaires qui peuvent aider au diagnostic étiologique.

Après injection de gadolinium, l'inflammation du péricarde se traduit par un rehaussement précoce des feuillets péricardiques qui restent tout à fait réguliers. Au contraire, le rehaussement est hétérogène avec un épaissement irrégulier du péricarde en cas de péricardite chronique ou d'atteinte tumorale du péricarde. L'épanchement péricardique n'est pas rehaussé.

En cas d'épanchement péricardique massif, un microvoltage de l'électrocardiogramme (ECG) peut compliquer la mise en place de la synchronisation cardiaque. De plus, l'examen peut être difficile chez des malades tachycardes ayant des difficultés à garder la position allongée.

Péricardite constrictive

Dans les suites d'une inflammation ou de modifications hémorragiques péricardiques, le péricarde peut devenir fibreux et calcifié. Ces altérations des feuillets péricardiques peuvent être à l'origine d'anomalies du remplissage diastolique des cavités cardiaques. On observe une augmentation des pressions diastoliques qui s'égalisent au niveau des quatre cavités. Cette dysfonction diastolique est à l'origine d'une tachycardie et d'une augmentation des pressions de remplissage à l'origine de signes de congestion

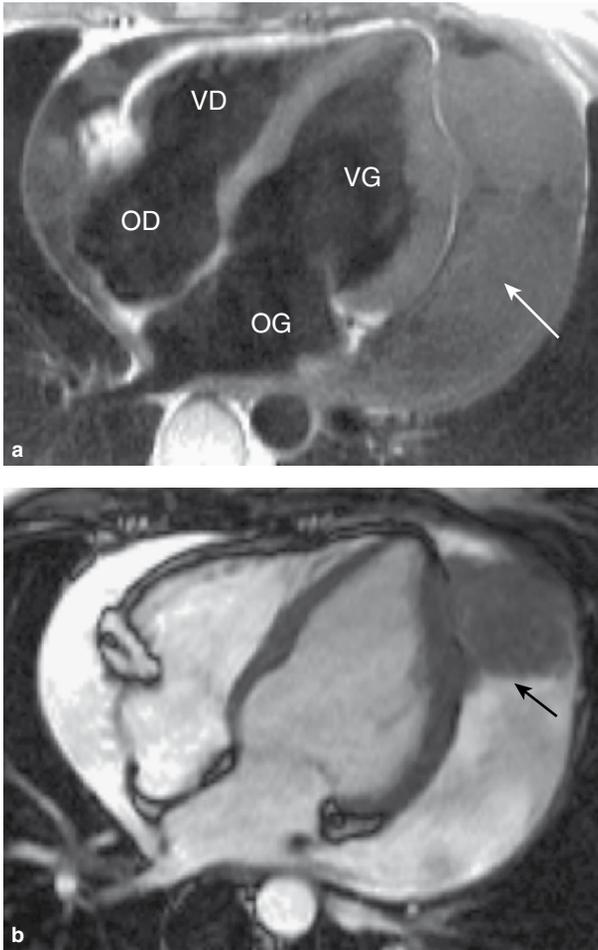


Figure 5.8 Coupe quatre cavités chez une femme de 42 ans présentant un épanchement péricardique de grande abondance en rapport avec des métastases d'un léiomyosarcome (**a**. flèche blanche; **b**. flèche noire). L'épanchement péricardique est à l'origine d'un signal intermédiaire sur la séquence en écho de spin (**a**) et d'un signal élevé sur la séquence en écho de gradient (**b**) sur laquelle on visualise plus nettement l'atteinte tumorale solide (flèche noire).

veineuse. La fonction systolique est habituellement préservée, sauf s'il existe une myocardite associée. Les conditions de remplissage auriculaire et ventriculaire deviennent très dépendantes des temps inspiratoire et expiratoire. La dépendance interventriculaire est très augmentée. Au cours de l'inspiration, le remplissage droit est augmenté avec déviation du septum interventriculaire vers le ventricule gauche et diminution du remplissage cardiaque gauche; on observe le contraire au cours de l'expiration. Il

est parfois difficile de distinguer les péricardites constrictives des cardiomyopathies restrictives, mais il existe des signes en IRM cardiaque, comme en scanner cardiaque. Le signe le plus important en faveur d'une péricardite constrictive est l'épaississement du péricarde, avec ou sans calcification péricardique (figure 5.9). Il faut être prudent dans la mesure de l'épaisseur du péricarde pour ne pas prendre en compte des effets de volume partiel qu'on peut observer en cas de plan de coupe oblique. Il faut pour cela se servir de la capacité tridimensionnelle de la méthode. La visualisation d'un épaississement péricardique et/ou de calcifications constitue un signe d'une excellente sensibilité. Au contraire, l'absence d'épaississement ou de calcification ne permet pas d'exclure définitivement le diagnostic de péricardite constrictive. C'est la raison pour laquelle une analyse de la fonction cardiaque doit être effectuée.

L'épaississement et l'épanchement péricardique sont généralement facilement visualisés dès les premières coupes d'IRM en écho de spin. Cet épaississement péricardique est confirmé sur les coupes pondérées en T1 en écho de spin rapide, il est facilement distingué d'un épanchement sur les coupes en mode ciné-IRM. Lorsqu'il existe un épanchement péricardique, on peut également se servir des séquences après injection de produit de contraste pour analyser l'épaisseur des feuillets viscéral et pariétal du péricarde. En cas d'épaississement péricardique chronique fibreux, il existe un rehaussement observé sur les séquences réalisées tardivement après injection, comme celui qui est observé en cas de lésion myocardique ischémique. Les calcifications sont à l'origine d'hyposignal en IRM cardiaque et dans ce dernier cadre, c'est le scanner qui constitue la modalité de référence. Les autres



Figure 5.9 Image quatre cavités en mode ciné-IRM chez une femme de 81 ans présentant des antécédents d'épanchement péricardique à répétition, traitée par drainage chirurgical et ayant des signes de péricardite chronique constrictive en cathétérisme. Il existe une dilatation biauriculaire et un épaississement du péricarde (flèches noires) qui mesure 9 mm dans ce plan. Il n'existe pas d'épanchement péricardique et la fraction d'éjection ventriculaire gauche est de 68 % (normale).

signes incluent des ventricules de petite taille ou de dimensions normales avec une fraction d'éjection normale, une dilatation des oreillettes et des veines caves, un épanchement pleural, une dilatation des veines hépatiques, un gros foie et de l'ascite. Il est également important d'évaluer l'abondance de la graisse épicaudique séparant l'épicarde du feuillet viscéral du péricarde épaissi ; c'est effectivement un renseignement important pour le chirurgien avant péricardectomie (débridement péricardique). Sur les coupes de ciné-IRM, on peut visualiser un mouvement paradoxal du septum interventriculaire qui est refoulé vers le ventricule gauche en protodiastole. Les coupes ciné-IRM sont également aptes à montrer l'amplification du phénomène de dépendance interventriculaire. Il faut pour cela réaliser des coupes en inspiration et en expiration forcée. Le déplacement paradoxal du septum interauriculaire est visible sur les séquences en inspiration forcée, alors qu'il a une position normale sur les coupes en expiration. La technique de tagging myocardique peut montrer les adhérences du myocarde au péricarde épaissi durant l'ensemble du cycle cardiaque.

En résumé, le protocole à utiliser en IRM cardiaque pour évaluer un épanchement ou une constriction péricardique inclut :

- des images d'écho de spin rapide en respiration libre dans les plans transversal, coronal et sagittal ;
- des séquences ciné-IRM dans les mêmes plans et dans des plans complémentaires en fonction des premières anomalies péricardiques visualisées ;
- des séquences en écho de spin rapide pondérées en T1 dans les plans sur lesquels les anomalies ont été visualisées ;
- des séquences en ciné-IRM et après injection de gadolinium dans ces mêmes plans ;
- en cas de suspicion de constriction péricardique :
 - des séquences ciné-IRM dans les plans quatre cavités et petit axe ;
 - des séquences ciné-IRM temps réel, petit axe médioventriculaire ;
 - des séquences de tagging dans les plans sur lesquels on a visualisé un épaississement péricardique.

Le compte rendu doit inclure :

1. les caractéristiques anatomiques telles que les dimensions des cavités cardiaques : l'existence d'une dilatation cave, d'un épaississement péricardique, d'un épanchement péricardique (il faut notamment préciser son abondance, l'éventuelle existence de zones enkystées afin de déterminer la localisation d'une éventuelle péricardiocentèse) et l'existence d'un épanchement pleural ;
2. l'analyse de la fonction cardiaque et notamment l'existence d'arguments pour une tamponnade ;
3. les arguments étiologiques et notamment l'existence d'un rehaussement au sein du péricarde et du myocarde.

Kyste et diverticule péricardique

Les kystes péricardiques ou kystes pleuropéricardiques sont la conséquence d'une anomalie de développement embryonnaire. Il s'agit de lésions bénignes qui se présentent sous la forme de lésions kystiques arrondies, bien limitées, généralement visualisées au niveau de l'angle cardiophrénique droit, qu'on peut également voir dans les régions hilaires ou médiastinales. Ces kystes pleuropéricardiques ne communiquent pas avec le sac péricardique. Ils sont à l'origine d'un hypersignal sur les séquences pondérées en T2 et d'un hyposignal ou d'un signal intermédiaire sur les séquences pondérées en T1 (figure 5.10). Il n'existe pas de rehaussement après injection de gadolinium.

Les diverticules péricardiques constituent de petites poches communiquant directement avec l'espace péricardique.

Absence congénitale du péricarde

L'absence congénitale du péricarde est rare. En général, elle est asymptomatique. Le défaut péricardique est généralement incomplet et situé à gauche. On peut également observer des défauts droits diaphragmatiques, voire des absences complètes de péricarde. Ces défauts péricardiques peuvent être associés à des cardiopathies congénitales telles que les communications interauriculaires, la persistance du canal artériel et la tétralogie de Fallot. Il existe un déplacement postérolatéral du cœur. On peut alors observer une dilatation auriculaire gauche. L'issue de l'auricule gauche au sein d'un défaut péricardique incomplet peut être à l'origine d'une mort subite. L'IRM cardiaque peut montrer le défaut, les anomalies cardiaques associées et la possible hernie (figure 5.11).

■ Myocardite

De nombreux agents infectieux peuvent être à l'origine de myocardite. Ce sont les séquences réalisées tardivement après injection de produit de contraste qui constituent la clé du diagnostic. Le rehaussement myocardique observé ne correspond pas à un territoire vasculaire et la localisation est généralement sous-épicardique, le plus fréquemment située au niveau de la paroi libre du ventricule gauche (figure 5.12). L'observation de ces signes en présence d'un contexte clinique évocateur permet d'éviter un cathétérisme et la réalisation de biopsies endomyocardiques. L'IRM cardiovasculaire est également largement utilisée pour la surveillance au long cours de ces myocardites, avec l'analyse de l'évolution des prises de contraste anormales et la surveillance de la fonction myocardique.

■ Indications

L'IRM cardiovasculaire est apte à :

1. détecter et caractériser des masses cardiaques, dont les thrombus auriculaires et ventriculaires ;
2. réaliser le bilan d'extension des tumeurs cardiaques malignes ;
3. être utilisée dans le cadre de la surveillance oncologique ;

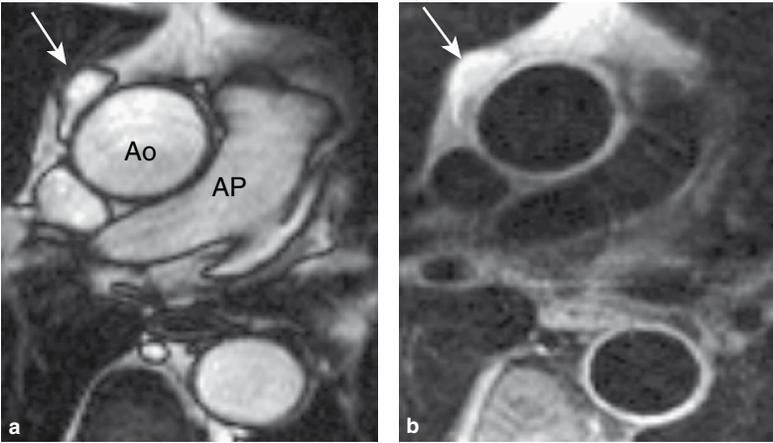


Figure 5.10 Découverte fortuite d'un petit kyste pleurocardique mesurant $2,6 \times 1,8 \times 5,0$ cm (flèche blanche) chez un homme de 71 ans adressé pour angiographie par résonance magnétique coronaire. Le kyste pleurocardique est à l'origine d'un hypersignal sur les séquences en ciné-IRM (a) et sur la séquence d'écho de spin pondérée en T2 (b) dans un plan transversal au niveau de la bifurcation de l'artère pulmonaire.

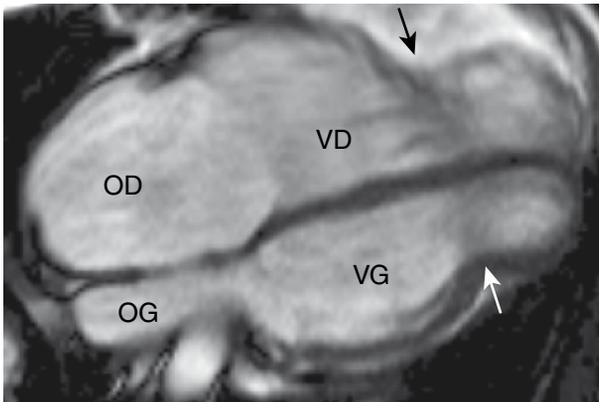


Figure 5.11 La séquence quatre cavités en ciné-IRM d'un malade de 46 ans montre la hernie des ventricules droit et gauche au sein d'un défaut péricardique (flèches). Il existe une dilatation ventriculaire et auriculaire droite secondaire à une insuffisance tricuspide importante qui n'est pas visualisée à ce niveau.

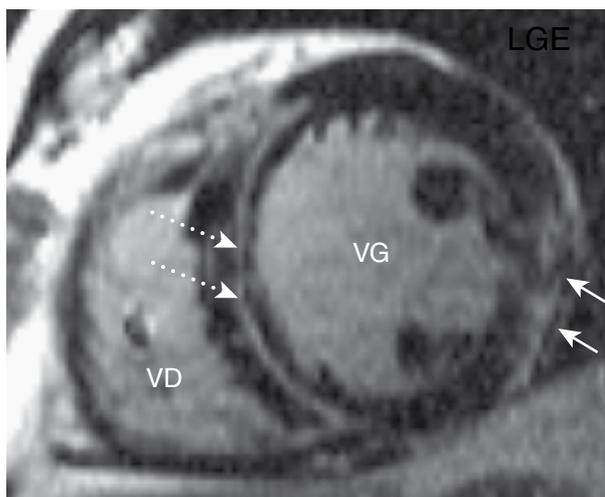


Figure 5.12 Séquence réalisée tardivement après injection de produit de contraste sur une coupe petit axe médioventriculaire chez un homme de 61 ans présentant des modifications électrocardiographiques et une coronarographie normale. On visualise un rehaussement au niveau de la partie moyenne du septum interventriculaire (flèches blanches discontinues) dans la région sous-épicardique de la paroi libre du ventricule gauche (flèches blanches continues). Il existe également une dilatation du ventricule gauche et une anomalie de la fraction d'éjection ventriculaire gauche (28 %) en rapport avec une myocardite.

4. détecter et caractériser les épanchements péricardiques ;
5. détecter les constrictions péricardiques ;
6. chercher des anomalies hémodynamiques telles que la dépendance interauriculaire en cas de péricardite chronique ;
7. détecter et caractériser des masses péricardiques ;
8. faire le diagnostic des anomalies congénitales du péricarde et des cardiopathies congénitales associées ;
9. faire le diagnostic des myocardites.

L'IRM cardiovasculaire n'est pas apte à :

1. évaluer de façon précise les patients souffrant de dyspnée importante et de tachycardie du fait des difficultés liées à la durée de l'examen, des artefacts respiratoires et de mouvements cardiaques ;
2. affirmer l'absence de calcification péricardique.

Affections aortiques

Beatriz Bouzas

■ Introduction

L'imagerie de l'aorte peut faire appel à de nombreuses techniques (figure 6.1). L'angiographie conventionnelle a longtemps été considérée comme la méthode de référence (gold standard), mais son caractère invasif, l'utilisation de radiations ionisantes et d'agents de contraste néphrotoxiques expliquent qu'elle n'est plus utilisée à

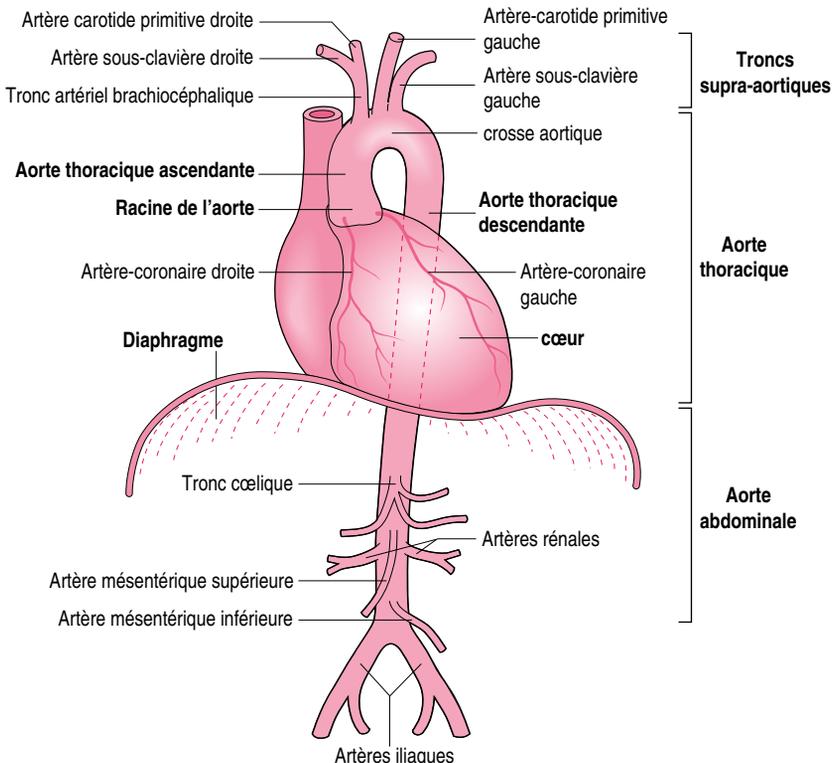


Figure 6.1 Représentation schématique de l'aorte normale.

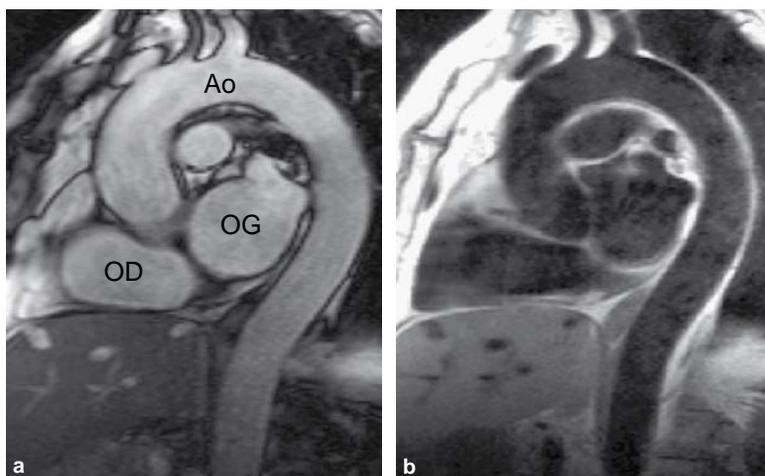


Figure 6.2 IRM cardiaque normale de l'aorte chez un homme de 60 ans adressé pour une hypertension artérielle ainsi que des antécédents familiaux d'anévrisme de l'aorte thoracique ascendante et de syndrome de Marfan. Les images sont obtenues dans le plan sagittal oblique avec des séquences en écho de gradient (a) et en écho de spin (b). Cette vue long axe de l'aorte est réalisée après un repérage initial dans le plan transversal et la réalisation du plan de coupe selon trois points : un point situé au niveau de l'aorte thoracique ascendante, un point situé au niveau de la crosse de l'aorte et un point situé au niveau de l'aorte thoracique descendante. Les mesures aortiques sont généralement réalisées en télédiastole et il est utile de signaler à quel niveau elles ont été effectuées.

titre diagnostique. Les modalités d'imagerie non invasive incluent l'échographie transœsophagienne, le scanner et l'IRM cardiovasculaire (figure 6.2). L'échographie transœsophagienne présente l'avantage du caractère portable de l'échographie, mais c'est un examen relativement invasif. Il n'est pas possible d'analyser précisément l'ensemble de l'aorte avec notamment l'existence de zones aveugles au niveau de la crosse.

Le scanner est largement disponible. Il s'agit d'une méthode d'imagerie rapide, mais qui implique l'utilisation de radiations ionisantes et d'agents de contraste néphrotoxiques. L'IRM cardiovasculaire n'a pas ces limites et permet une imagerie multiplanaire de l'aorte, avec un large champ de vue et la possibilité d'évaluer dans le même temps la fonction cardiaque.

En revanche, elle est moins facilement disponible et l'évaluation de patients en situation de réanimation peut être difficile.

Le compte rendu des IRM cardiovasculaires réalisées pour affection aortique doit inclure :

1. l'évaluation anatomique du cœur et de l'aorte ;
2. l'évaluation de la fonction cardiaque, par exemple l'évaluation de l'importance d'une insuffisance aortique et du degré d'hypertrophie myocardique ;
3. la cause probable de la maladie aortique.

■ Anévrisme de l'aorte thoracique

Un anévrisme de l'aorte constitue une dilatation localisée de l'aorte. En fonction de la forme de cette dilatation, on décrit des anévrismes fusiformes, caractérisés par une dilatation symétrique et circonférentielle de l'aorte, et des anévrismes sacciformes, pour lesquels la dilatation ne concerne qu'une des faces de l'aorte. Les anévrismes de l'aorte peuvent également être distingués en vrai anévrisme et pseudoanévrisme. Les vrais anévrismes sont caractérisés par une dilatation qui intéresse l'ensemble des constituants de la paroi aortique et par l'existence d'un collet large. Au contraire, en cas de pseudoanévrisme, la perforation de l'intima et de la média est contenue uniquement par la couche adventitielle et par le tissu péri-aortique, et le collet de ce pseudoanévrisme est généralement étroit.

Les anévrismes de l'aorte sont généralement d'origine athéromateuse et intéressent le plus fréquemment l'aorte descendante (figure 6.3). Les autres causes d'anévrisme sont les traumatismes, les affections du tissu conjonctif comme les syndromes de Marfan et les syndromes d'Ehlers-Danlos, les anomalies congénitales et les infections comme la syphilis. Les anévrismes post-sténotiques sont généralement la conséquence d'une dilatation anévrismale en aval d'un rétrécissement aortique ou d'une coarctation aortique. L'IRM cardiovasculaire permet la détection des anévrismes de l'aorte et leur évaluation précise comme suit :

- localisation des anévrismes, forme, dimension dans les trois dimensions de l'espace ;
- atteinte de la valve aortique, de la racine de l'aorte et des artères coronaires ;
- atteinte des efférences artérielles, telles que l'artère sous-clavière gauche, les artères rénales ou les artères iliaques ;
- existence et localisation d'une thrombose anévrismale ;
- dissection aortique associée ;
- épanchement péricardique (figure 6.4).

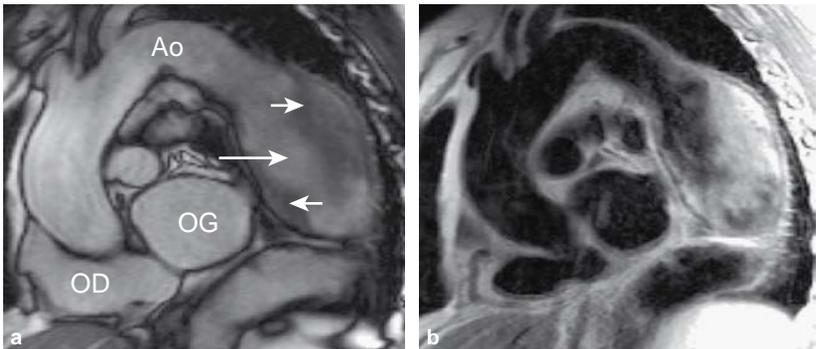


Figure 6.3 Coupe sagittale oblique en mode ciné-IRM (a) et en écho de spin pondérée en T1 (b) chez un homme de 74 ans présentant un anévrisme fusiforme de l'aorte thoracique descendante, de 6,2 cm (flèche longue), contenant un thrombus mural (petites flèches blanches).

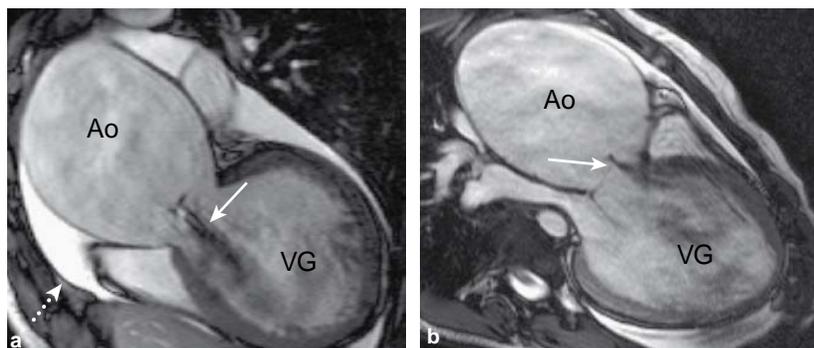


Figure 6.4 La séquence de ciné-IRM dans le plan chambre de chasse du ventricule gauche chez un homme de 20 ans porteur d'un syndrome de Marfan montre un anévrisme de l'aorte thoracique ascendante (Ao) mesurant 11,5 cm dans sa plus grande dimension, associé à une insuffisance aortique sévère (flèches blanches continues), une dilatation ventriculaire et un épanchement péricardique de petite abondance (flèche blanche discontinue). Il n'y avait pas de signe de dissection aortique.

Les images obtenues en écho de spin dans le plan transversal et dans le grand axe de l'aorte sont utilisées pour mesurer les diamètres de l'aorte et les relations de l'anévrisme aux efférences artérielles principales. Les plans frontal et sagittal oblique permettent d'analyser facilement la crosse aortique et les segments tortueux de l'aorte. Des zones de flux sanguin ralenti ou turbulent peuvent être à l'origine d'images aptes à simuler des thrombus muraux sur les images en écho de spin. Les images en mode ciné-IRM et en cartographie des vitesses permettent de différencier les zones de flux lent des thrombus anévrismaux.

Lorsqu'on visualise une thrombose anévrismale, elle doit être mesurée en épaisseur et évaluée en hauteur. L'IRM cardiovasculaire permet d'évaluer la composition de la thrombose anévrismale caractérisée par les modifications de signal en rapport avec les propriétés paramagnétiques de la déoxyhémoglobine et de la méthémoglobine. La méthémoglobine, un des produits de dégradation de l'hémoglobine, diminue le T1 et augmente le T2; elle est donc à l'origine d'un hypersignal sur les séquences pondérées en T1 et sur les séquences pondérées en T2. Les thrombus à l'origine d'un hyposignal en T1 et en T2 correspondent à des thrombus complètement organisés. Certains de ces thrombus organisés peuvent avoir un secteur interne hyperintense en T1 qui correspond à de nouveaux phénomènes de thrombose à la surface du thrombus organisé. Les thrombus caractérisés par un hypersignal en T1 et en T2 correspondent à des thrombus non organisés, principalement composés de thrombus relativement frais. Enfin, certains thrombus sont partiellement organisés, avec des zones hyperintenses et des zones hypo-intenses (figure 6.5). Les anévrismes aortiques inflammatoires sont caractérisés par une zone fibro-inflammatoire périaortique rehaussée après l'injection de gadolinium. Ces remaniements périaortiques sont mieux visualisés sur des séquences pondérées en T1 avec suppression de la graisse.

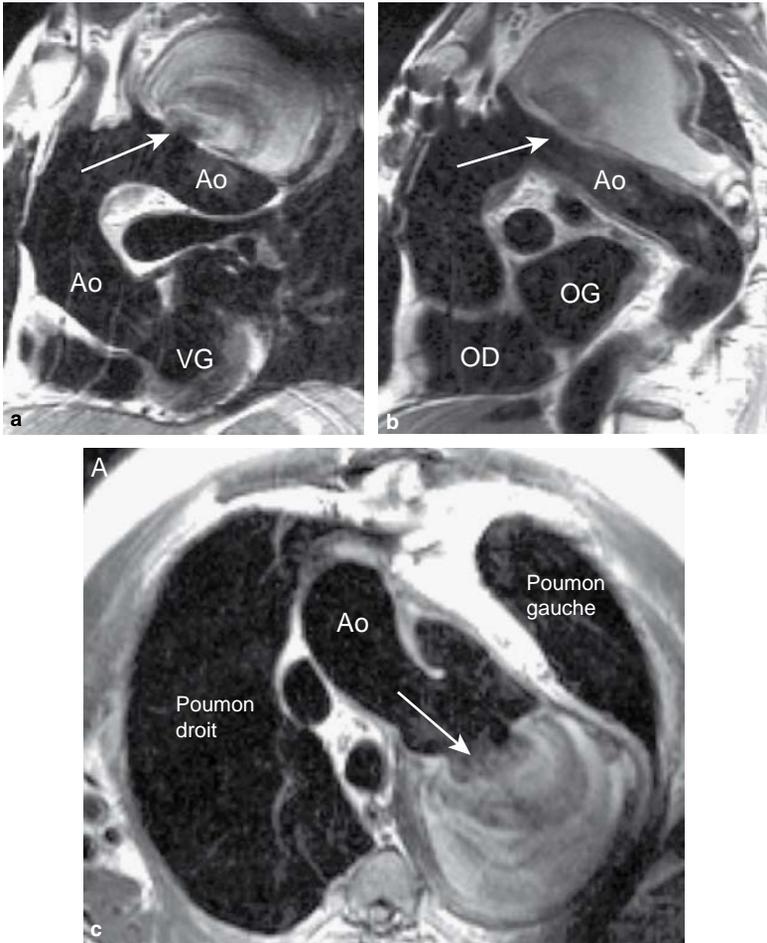


Figure 6.5 L'image d'écho de spin pondérée en T2 dans un plan coronal (a), sagittal (b) et transversal (c) chez une femme de 70 ans montre un pseudoanévrisme de la crosse de l'aorte mesurant 10 x 6 cm, développé à partir du bord externe de la crosse de l'aorte distale contenant un thrombus mural partiellement organisé (flèches blanches).

L'angiographie par résonance magnétique (ARM) permet d'analyser le flux aortique et la perméabilité des principales efférences artérielles.

Les images sont acquises dans le grand axe de l'aorte et peuvent être reconstruites dans le plan transversal. Différentes techniques de reconstruction, telles que les techniques MIP (*maximum intensity projection*) et VRT (*volume rendering technique*), peuvent être utilisées pour obtenir des représentations anatomiques de qualité (figure 6.6). L'IRM cardiovasculaire est également utilisée pour la surveillance de l'évolution des anévrismes de l'aorte, en réalisant la mesure des dimensions des anévrismes de l'aorte sur ces examens successifs.

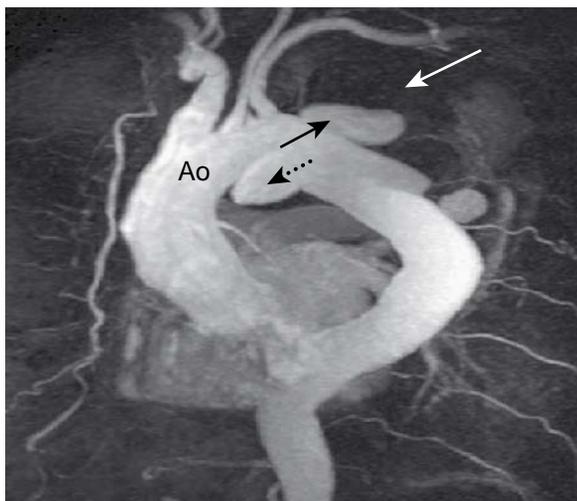


Figure 6.6 Reconstruction MIP (maximum intensity projection) de l'ARM correspondant au cas illustré en figure 6.5. Le volumineux pseudoanévrisme aortique (flèche blanche) est en communication avec la lumière aortique par le biais d'un collet de 2,5 cm (flèche noire continue). Il existe un deuxième pseudoanévrisme plus petit (3,5 × 2,3 × 6 cm) développé aux dépens de la face inférieure de la crosse de l'aorte (flèche noire discontinue).

La mise en place par voie percutanée d'endoprothèse aortique est actuellement utilisée pour le traitement des anévrismes des dissections de l'aorte. L'IRM cardiovasculaire est utilisée pour effectuer le bilan avant mise en place de ces endoprothèses afin de choisir une endoprothèse adaptée à l'anatomie aortique et à la localisation de l'anévrisme et pour rechercher des fuites aortiques après mise en place de l'endoprothèse. En revanche, la quantification précise des calcifications aortiques est plus facilement effectuée en scanner qu'en IRM.

■ Dissection aortique

La dissection aortique correspond à une brèche intimale à l'origine de la formation d'un vrai et d'un faux chenal séparés par un flap. La dissection aortique peut s'étendre dans un mode antérograde ou rétrograde et intéresser toute la longueur de l'aorte. La dissection aortique peut être à l'origine d'une occlusion ou d'une obstruction des efférences artérielles, d'une régurgitation aortique et d'un épanchement péricardique. Les causes de dissection incluent l'hypertension artérielle (cause la plus fréquente), l'athérosclérose, les lésions congénitales, les causes iatrogènes et traumatiques.

Les dissections aortiques peuvent être distinguées en se servant de deux systèmes de classification, de De Bakey ou de Stanford. La classification de De Bakey repose sur la localisation de la brèche intimale et sur l'extension de la dissection :

- type I : brèche intimale au niveau de l'aorte thoracique ascendante et extension de la dissection au-delà de l'origine de l'artère sous-clavière gauche ;

- type II : brèche intimale au niveau de l'aorte thoracique ascendante et dissection limitée à l'aorte thoracique ascendante ;
- type III : brèche intimale située au-delà de l'origine de l'artère sous-clavière gauche et extension distale de la dissection.

La classification de Stanford est fondée sur les implications pronostiques dont découle la prise en charge :

- type A : la dissection intéresse l'aorte thoracique ascendante (figure 6.7) ;
- type B : la dissection n'intéresse pas l'aorte thoracique ascendante (figure 6.8).

Les dissections de type A sont caractérisées par une morbidité élevée et imposent une prise en charge chirurgicale urgente. Au contraire, les dissections de type B ont un meilleur pronostic et sont généralement traitées médicalement.

L'IRM cardiovasculaire constitue le standard de référence (gold standard) pour le diagnostic et la caractérisation des dissections aortiques ainsi que la recherche de complication chez un patient hémodynamiquement stable. Les données à évaluer en IRM cardiovasculaire sont les suivantes :

- localisation de la brèche intimale et atteinte de l'aorte thoracique ascendante, de la valve aortique et des artères coronaires ;
- extension de la dissection aortique et sites de réentrée ;
- présence de thrombus au sein du faux chenal ;
- atteinte des efférences artérielles en précisant à partir de quel chenal elles sont issues ;
- épanchement péricardique et pleural associé.

Les séquences en écho de spin montrent le flap intimal sous la forme d'une structure linéaire séparant vrai et faux chenal. Des zones de flux lent, généralement au sein du faux chenal, sont différenciées des zones de thrombus par les coupes en ciné-IRM. Les coupes de ciné-IRM sont également utiles pour détecter l'insuffisance aortique, les séquences en écho de spin et en ciné-IRM permettent également de faire le diagnostic des épanchements péricardiques. Les coupes en cartographie des vitesses permettent de visualiser les zones de flux circulaire ralenti des zones thrombosées et permettent d'analyser les flux circulatoires au sein du faux chenal. Lorsqu'il existe une insuffisance aortique, elle peut être quantifiée par les séquences de cartographie des vitesses dans le plan approprié. L'ARM permet de bien visualiser le flap et l'atteinte des efférences artérielles.

■ Hématome mural et ulcère athéromateux pénétrant

L'hématome mural a la même présentation clinique et le même pronostic que la dissection de l'aorte et, comme elle, la cause la plus fréquente est constituée par l'hypertension artérielle. Il est provoqué par la rupture spontanée des vasa vasorum de l'aorte avec propagation de l'hémorragie sous-intimale et risque d'évolution vers la dissection aortique et la rupture de la paroi de l'aorte. Au contraire des dissections aortiques, l'hématome mural intéresse le plus souvent l'aorte thoracique descendante. Dans ces conditions, on

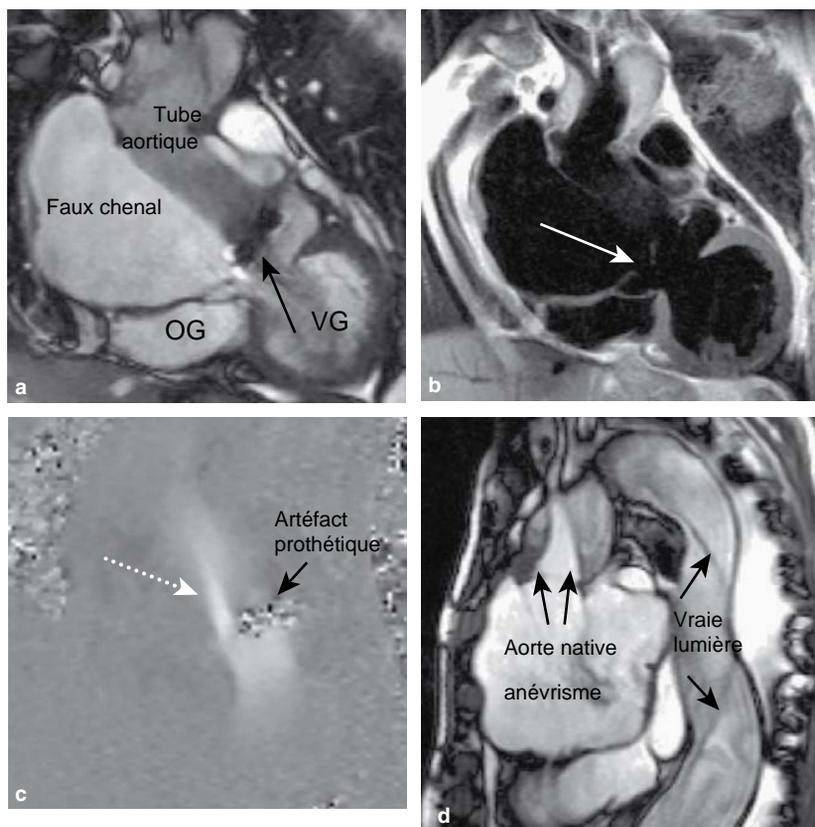


Figure 6.7 IRM cardiaque d'un homme de 57 ans chez lequel on a mis en place un tube aortique et remplacé la valve aortique. Dans les suites, une insuffisance aortique et une dilatation du segment initial de l'aorte thoracique ont été notées. **a.** La coupe ciné-IRM dans l'incidence chambre de chasse du ventricule gauche confirme une dilatation anévrysmale de l'aorte thoracique ascendante avec un faux chenal développé en dehors du tube aortique. La déhiscence de la ligne postérieure de suture de la valve aortique se traduit par une bascule de la valve et une insuffisance aortique paravalvulaire importante (flèche noire longue).

b. L'image correspondante en écho de spin pondérée en T2 montre la déhiscence de la ligne de suture (ligne blanche continue). La séquence en cartographie des vitesses (**c**) dans le même plan montre le flux circulatoire existant entre le ventricule gauche et le faux chenal (flèche blanche discontinue). La coupe en ciné-IRM dans un plan sagittal oblique montre le flap au niveau de l'aorte proximale et de l'aorte thoracique descendante (flèches noires courtes).

observe plus rarement une insuffisance aortique ou une atteinte des troncs supra-aortiques. Le pronostic et la prise en charge des hématomes muraux dépendent de la localisation de l'hématome, les hématomes de l'aorte thoracique ascendante ayant un taux de complication bien plus élevé nécessitant une réparation chirurgicale urgente.

Les hématomes muraux de l'aorte sont visualisés sous la forme d'un épanchement sanguin localisé et/ou d'une augmentation de l'épaisseur de la paroi aortique, qui peut être asymétrique ou circonférentielle (figure 6.9). Les images d'écho de spin pondérées en T1 et



Figure 6.8 Dissection aortique résiduelle de type B chez un homme de 67 ans après chirurgie d'une dissection de type A, 1 an auparavant. **a.** La coupe en écho de spin sagittale oblique montre le faux chenal (flèche blanche), étendu de 4 cm après l'artère sous-clavière gauche jusqu'à 2 cm au-dessus du diaphragme. Le faux chenal est largement thrombosé, sans signe en faveur d'un thrombus récent. **b.** La coupe ciné-IRM coronale montre la dissection de l'aorte abdominale (ellipse blanche). **c.** La reconstruction en MIP (maximum intensity projection) de l'ARM montre les deux dissections (flèche blanche et ellipse blanche). Les deux artères rénales sont issues du vrai chenal.

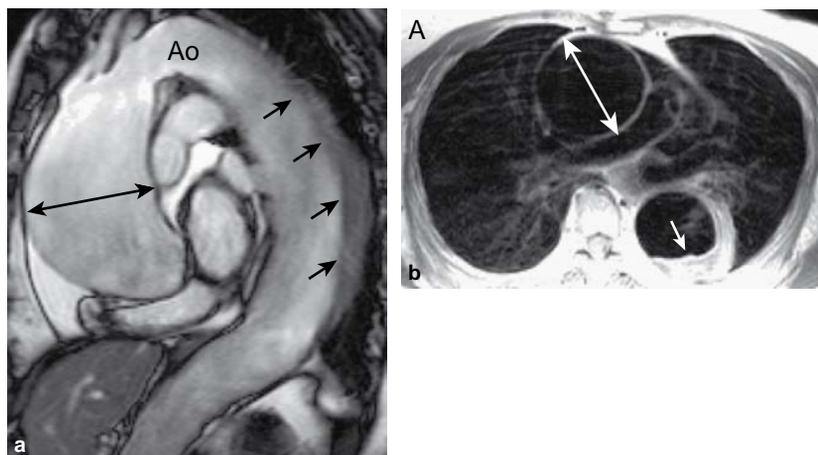


Figure 6.9 Coupe sagittale oblique en mode ciné-IRM de l'aorte (a) et coupe transversale en écho de spin pondérée en T2 (b) d'un homme de 79 ans présentant une hypertension artérielle chronique, un anévrisme de l'aorte thoracique ascendante (double flèche), un hématome mural de l'aorte thoracique distale et de l'aorte thoracique descendante (petite flèche).

en T2 permettent d'approcher la date de survenue de l'hématome. Les hématomes muraux aigus (premiers 5 à 7 j) sont visualisés sous la forme d'un épaississement de la paroi artérielle présentant un signal intermédiaire comparable à celui de la paroi aortique. Les hématomes subaigus (plus de 8 j) sont visualisés sous la forme d'un épanchement hémattique hyperintense du fait de la présence de méthémoglobine. L'analyse doit être faite à l'aide de coupes transversales plutôt que de coupes longitudinales, afin de mieux distinguer l'hématome de la graisse médiastinale. Il peut être utile de se servir de coupes avec suppression de la graisse afin d'améliorer la différenciation hématome/graisse. L'ARM est généralement négative, puisqu'il n'existe pas d'anomalie luminale.

L'ulcère athéromateux pénétrant est provoqué par une brèche intimale pénétrant au sein de la paroi aortique. Cette entité ulcère athéromateux pénétrant est proche de l'entité hématome mural avec un risque commun de l'évolution vers une dissection aortique et vers une perforation pariétale. L'ARM montre une zone très limitée d'extravasation de produit de contraste communiquant avec la lumière aortique. Les ulcères athéromateux pénétrants sont généralement visualisés au niveau de l'aorte thoracique descendante et de l'aorte abdominale, le facteur de risque le plus fréquemment mis en cause est l'athérosclérose.

■ Aortite

L'artérite de Takayasu est une vascularite granulomateuse de cause inconnue qui intéresse fréquemment l'aorte thoracique et l'aorte abdominale. Les lésions inflammatoires sont à l'origine d'un épaississement de la paroi aortique et de la paroi de l'origine des efférences principales, notamment au niveau des troncs supra-aortiques. Cette atteinte peut se traduire par une thrombose, une sténose ou une occlusion des efférences

artérielles. Les artères pulmonaires peuvent également être touchées. Les séquences en écho de spin montrent un épaissement pariétal diffus et l'ARM montre les complications anévrismales ou les sténoses et les occlusions des efférences artérielles.

■ Syndrome de Marfan

Le syndrome de Marfan est une affection du tissu conjonctif d'origine génétique. Il se traduit par des anomalies cardiovasculaires, squelettiques et oculaires. L'IRM cardiovasculaire permet de faire le diagnostic de :

- insuffisance mitrale et insuffisance tricuspide par prolapsus valvulaire ;
- dilatation de la racine de l'aorte ;
- anévrisme de l'aorte thoracique ascendante et de l'aorte thoracique descendante ;
- dissection aortique.

Dissection aortique et rupture aortique sont les principales causes de mort chez les patients atteints de syndrome de Marfan et impliquent l'intérêt d'une surveillance cardiovasculaire régulière de l'aorte afin que de prévoir un remplacement aortique en cas de dilatation.

Les dimensions de la racine de l'aorte et le mode évolutif de cette dilatation aortique constituent les indicateurs principaux du risque de dissection aortique et le remplacement de l'aorte est recommandé à partir d'un diamètre aortique de 55 à 60 mm. Lorsqu'il existe une histoire familiale de dissection aortique, le remplacement valvulaire est réalisé à partir du seuil de 50 mm. La possibilité d'atteinte de l'aorte thoracoabdominale nécessite une surveillance régulière après remplacement aortique. Cette surveillance doit être particulièrement intensive chez les patients ayant présenté une dissection aortique ou des anévrismes des artères périphériques.

■ Coarctation aortique

La coarctation aortique est observée chez environ 1 individu sur 10 000 et est généralement diagnostiquée chez l'enfant ou chez l'adulte jeune. Elle se manifeste le plus fréquemment sous la forme d'une sténose aortique juste en aval de l'origine de l'artère sous-clavière gauche. La coarctation aortique peut se manifester sous la forme d'un rétrécissement très localisé ou d'un long segment artériel hypoplasique, intéressant la crosse aortique et l'aorte thoracique descendante. Le caractère hémodynamiquement significatif de la sténose se traduit par le développement de collatéralités artérielles, à partir des artères intercostales, des artères thoraciques internes et des artères spinales antérieures qui dérivent le sang artériel vers l'aorte thoracique descendante (figure 6.10). Une bicuspidie aortique est fréquemment observée en cas de coarctation aortique, elle peut donc se compliquer d'un rétrécissement ou d'une insuffisance aortique. Une dilatation de l'aorte thoracique ascendante peut être à l'origine de la formation d'un anévrisme de l'aorte thoracique ou de dissection de type A chez ces patients. L'IRM cardiovasculaire constitue la modalité de référence chez les patients porteurs de coarctation aortique. Doivent être évalués :

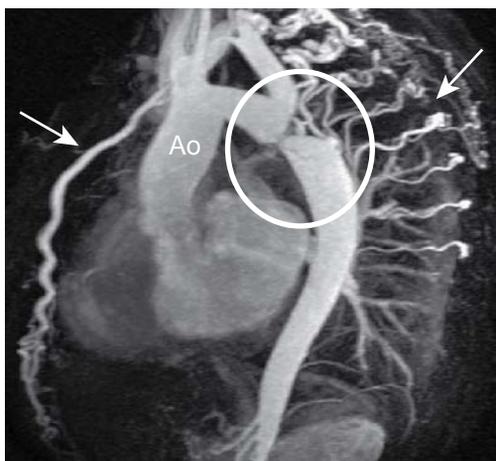


Figure 6.10 Reconstruction MIP (maximum intensity projection) d'une ARM dans le plan sagittal chez une femme de 25 ans qui montre une coarctation très localisée de l'aorte thoracique, juste en aval de l'artère sous-clavière gauche (cercle blanc). Des collatéralités thoraciques internes et intercostales sont montrées (flèches).

- la localisation, l'extension, le degré de coarctation aortique ;
- le flux circulatoire à travers la sténose et l'évaluation de la sévérité ;
- l'existence de collatéralités artérielles ;
- l'existence d'anomalies cardiovasculaires associées, telles qu'une bicuspidie aortique ou une dilatation de l'aorte thoracique ascendante ;
- l'évolution postopératoire.

Le plan sagittal oblique est utilisé en écho de spin et en mode ciné-IRM pour analyser l'anatomie, mais d'autres plans peuvent être utiles lorsque la tortuosité aortique est marquée.

L'analyse du flux sanguin au niveau de la sténose est réalisée à l'aide de coupes ciné-IRM et de coupes de cartographie des vitesses.

À l'aide des séquences de cartographie des vitesses, il est possible d'évaluer les vitesses circulatoires et de calculer le gradient de pression en se servant de l'équation de Bernoulli modifiée.

Une vitesse maximale au repos supérieure à 3 m/s est significative, notamment lorsqu'il existe une prolongation de la vitesse diastolique. Les vitesses circulatoires peuvent être normales en présence de coarctations significatives, s'il existe un développement marqué des collatérales artérielles. Il est possible d'évaluer le pourcentage de collatéralité en se servant des mesures de flux circulatoires en amont et en aval de la coarctation. La collatéralité est particulièrement marquée dans les coarctations serrées. L'ARM montre les tortuosités aortiques, l'atteinte des troncs supra-aortiques et le développement de la collatéralité.

Le devenir évolutif des coarctations aortiques opérées entre l'âge de 2 et 5 ans est d'excellente qualité. Les complications tardives incluent l'hypertension artérielle, la

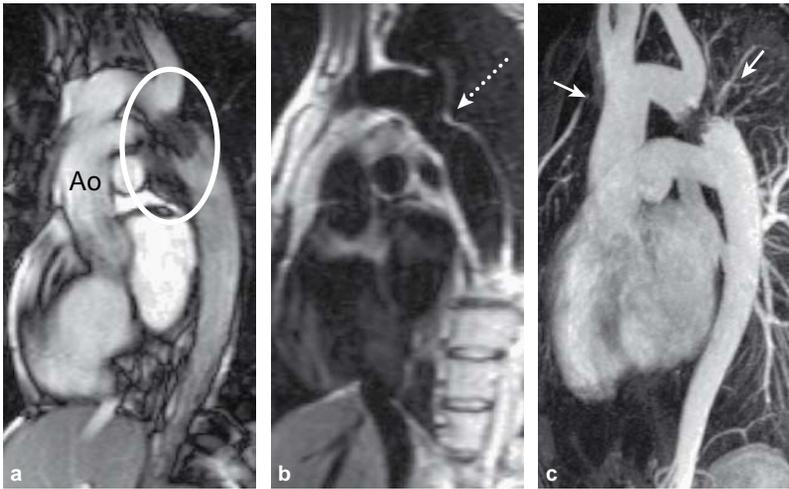


Figure 6.11 Surveillance à 1 an d'une coarctation aortique opérée chez le patient imagé en figure 6.10. La coupe sagittale oblique montre une sténose résiduelle minimale. Les coupes en ciné-IRM (a) montrent des artéfacts métalliques en rapport avec la présence de la prothèse (ellipse blanche). Les coupes en cartographie des vitesses ont montré une augmentation de la vitesse systolique sans prolongement diastolique. Les coupes d'écho de spin pondérées en T2 (b) sont moins artéfactées par la présence de la prothèse et permettent d'évaluer le rétrécissement résiduel (flèche blanche discontinue). c. L'ARM en mode MIP montre la réduction des flux collatéraux (flèches blanches).

re-sténose, la sténose résiduelle et le développement d'un anévrisme. L'IRM cardiovasculaire est réalisée après l'intervention pour servir de modalité de référence et de façon régulière en fonction des signes cliniques et radiologiques (figures 6.11 et 6.12). La survenue d'une hémoptysie chez un malade porteur de coarctation peut traduire une extravasation sanguine par le biais d'un pseudoanévrisme. Dans ces conditions, des coupes en écho de spin doivent être réalisées pour rechercher un hématome para-aortique à l'origine d'un hypersignal.

■ Anomalies aortiques congénitales rares

La crosse aortique droite correspond à une crosse aortique unique située à droite de la trachée. Cette anomalie est généralement associée aux tétralogies de Fallot et aux troncs artériels communs.

Un double arc aortique correspond à la présence d'une crosse aortique droite et d'une crosse aortique gauche résultant en la formation d'un anneau vasculaire autour de la trachée et de l'œsophage. Cet anneau peut comprimer l'œsophage et la trachée, provoquant dyspnée et dysphagie. L'artère sous-clavière droite rétro-œsophagienne peut également comprimer la trachée ou l'œsophage.

L'IRM cardiovasculaire, avec des séquences d'écho de spin et des séquences de ciné-IRM, permet une évaluation rapide et fiable de l'anatomie de la crosse de l'aorte et l'analyse des relations anatomiques entre la crosse de l'aorte et les structures de voisinage.

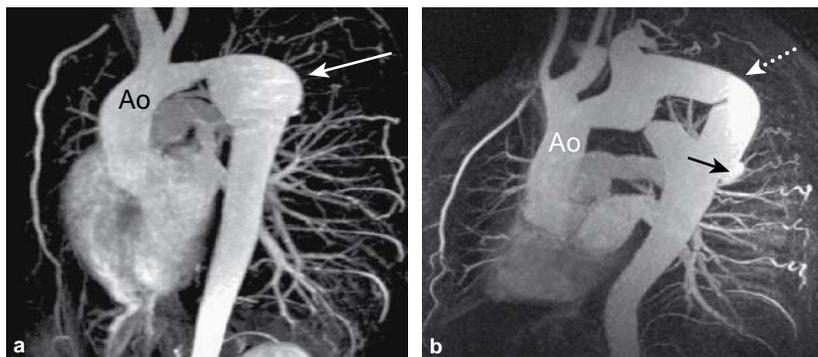


Figure 6.12 Deux exemples de développement d'anévrisme dans les suites postopératoires d'une réparation d'une coarctation aortique en se servant de l'ARM reconstruite en mode MIP. **a.** ARM d'un jeune homme de 19 ans ayant bénéficié d'une réparation d'une coarctation aortique à l'âge de 3 ans. Un anévrisme fusiforme (flèche blanche continue) s'est constitué en aval de la re-coarctation de l'aorte thoracique moyenne. **b.** ARM d'un homme de 51 ans chez lequel la coarctation a été réparée à l'aide d'un greffon entre l'artère sous-clavière gauche dilatée et l'aorte thoracique descendante (flèche blanche discontinue). Il existe un petit pseudoanévrisme au niveau de la ligne de suture distale (flèche noire).

Des cardiopathies congénitales associées peuvent également être détectées. De plus, l'ARM permet une représentation anatomique de très bonne qualité de ces anomalies.

■ Indications

L'IRM cardiovasculaire peut :

1. faire le diagnostic des anévrismes de l'aorte thoracique, des dissections aortiques, des hématomes muraux et des ulcères athéromateux pénétrants, des coarctations (et des pseudocoarctations) de l'aorte, des anomalies aortiques congénitales rares ;
2. permettre la surveillance de ces patients et des patients atteints de syndrome de Marfan avant et après la chirurgie. Les artéfacts métalliques peuvent gêner la qualité de l'image, mais permettent cependant une évaluation de bonne qualité diagnostique ;
3. permettre l'évaluation préopératoire ;
4. permettre de distinguer les dissections aortiques des hématomes muraux et des ulcères athéromateux pénétrants ;
5. permettre, dans le même temps, une évaluation cardiaque anatomique et fonctionnelle.

L'IRM cardiovasculaire ne peut pas :

1. évaluer de façon fiable la présence de calcifications au sein de la paroi aortique ;
2. être utilisée chez un patient hémodynamiquement instable.

Cardiopathies congénitales chez l'adulte

Richard Steeds

■ Introduction

Les cardiopathies congénitales ont une incidence d'environ 1 % (figure 7.1). Les améliorations de la prise en charge médicale et chirurgicale ont eu pour résultat l'augmentation de la population d'adultes jeunes porteurs de cardiopathie congénitale qui nécessite une prise en charge régulière du fait de la correction palliative, plus souvent que curative, de ces cardiopathies. L'IRM cardiovasculaire permet une évaluation non invasive régulière de ces jeunes adultes porteurs de cardiopathie congénitale.

L'IRM cardiovasculaire permet d'éviter, dans de nombreux cas, les modalités d'exploration invasives telles que le cathétérisme cardiaque. Ce sont les résultats de l'IRM cardiovasculaire qui permettent de déterminer si un cathétérisme cardiaque reste nécessaire.

Les images et mesures obtenues en IRM cardiaque complètent celles qui sont obtenues en échocardiographie, notamment en postopératoire. Une évaluation anatomique et fonctionnelle des pathologies cardiaques complexes peut être obtenue dans les trois plans de l'espace. C'est la raison pour laquelle l'IRM cardiovasculaire constitue une modalité de référence en matière de cardiopathie congénitale en préopératoire comme en postopératoire.

■ Protocole

Les protocoles d'IRM cardiaque standard utilisés dans les cardiopathies congénitales de l'adulte sont fondés sur l'évaluation de la morphologie et de la fonction cardiaque avec recherche de sténose, de régurgitation, de communication anormale et analyse des cavités cardiaques. L'angiographie par résonance magnétique (ARM) et les séquences de caractérisation tissulaire sont de plus en plus souvent utilisées. Le compte rendu doit inclure :

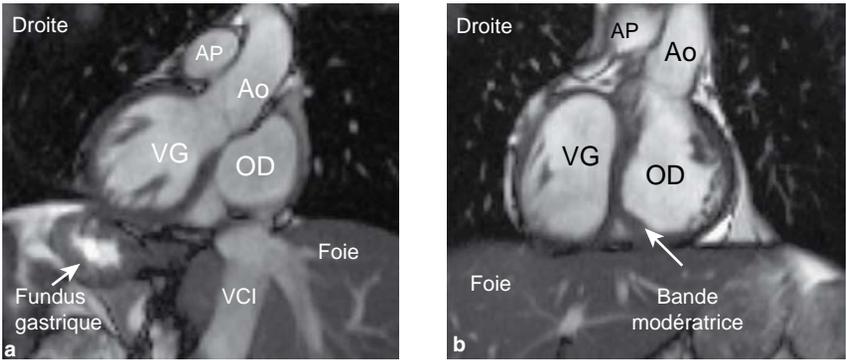


Figure 7.1 Deux cas de dextrocardie. **a.** Coupe ciné-IRM en incidence chambre de chasse du ventricule gauche chez une femme de 42 ans porteuse d'un situs inversus et d'une dextrocardie. Le situs inversus est beaucoup plus fréquemment observé en cas de dextrocardie. L'incidence des cardiopathies congénitales est de 3 à 5 % chez les patients porteurs de situs inversus associé à une dextrocardie. Il s'agit généralement de transposition des gros vaisseaux. En revanche, le situs inversus associé à une lévocardie est presque toujours associé à une cardiopathie congénitale. **b.** Séquence de ciné-IRM dans le plan coronal chez un homme de 40 ans présentant un situs solitus et une dextrocardie. Il existe également une transposition associée des gros vaisseaux corrigée.

1. les dimensions des cavités cardiaques ;
2. l'analyse de la fonction ventriculaire et de la masse cardiaque ;
3. l'analyse des anomalies circulatoires.

Les autres points à aborder dans le compte rendu sont soulignés au sein de chacune des pathologies spécifiques.

Morphologie et fonction cardiaque

Les séquences d'écho de spin en apnée et les séquences de ciné-IRM dans les trois plans de l'espace (transversal, coronal et sagittal) sont indispensables afin de programmer les autres plans de coupe. Il est possible de réaliser une évaluation anatomique complète en dépit des limites imposées par les séquences en apnée, en programmant des paquets de coupes successifs et en permettant au malade de respirer entre ces différents plans. Il est également possible de se servir de séquences permettant de diminuer le temps d'acquisition. Lorsqu'il existe des pièces métalliques, les artéfacts d'origine métallique sont beaucoup moins visibles sur les séquences d'écho de spin rapide que sur les séquences d'écho de gradient.

Les coupes en ciné-IRM dans les trois plans de l'espace programmées en fonction des résultats visualisés sur les premières séquences permettent une analyse anatomique et fonctionnelle des dimensions ventriculaires, de la fonction ventriculaire et de la masse cardiaque. L'analyse du ventricule droit et de l'artère pulmonaire est particulièrement importante dans le cadre des cardiopathies congénitales chez l'adulte, ainsi que les informations que l'on peut obtenir sur les vitesses circulatoires,

les fractions de régurgitation et l'importance des shunts anormaux (figure 7.2). La vitesse d'encodage maximale est programmée à un niveau peu élevé pour l'analyse du système veineux et à un niveau très élevé pour l'analyse des shunts. La confrontation des résultats obtenus en ciné-IRM et en cartographie des vitesses est indispensable pour analyser les modes de flux circulatoire. Les coupes ciné-IRM permettent de positionner de façon optimale les séquences de cartographie des vitesses.

Injection de produit de contraste

L'ARM avec injection de gadolinium est indispensable à l'analyse du système artériel pulmonaire, de l'aorte et des troncs supra-aortiques. Les séquences obtenues tardivement après injection sont utilisées à la recherche de lésions ischémiques ou de lésions cicatricielles du myocarde ventriculaire.

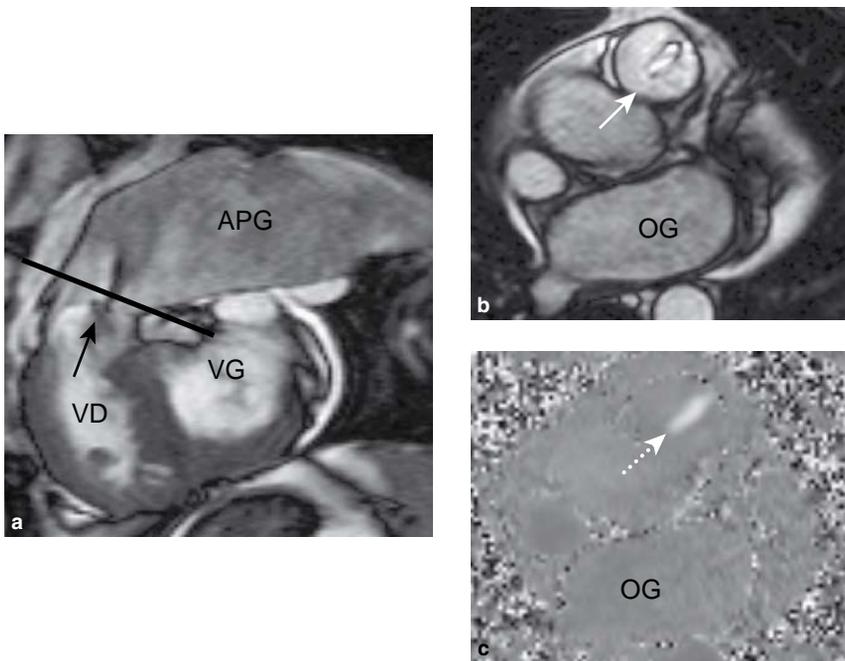


Figure 7.2 IRM cardiovasculaire préopératoire chez une femme de 73 ans présentant une sténose pulmonaire. **a.** Les coupes ciné-IRM dans une incidence sagittale oblique permettent la visualisation de la sténose pulmonaire (valve pulmonaire; flèche noire), de l'anévrisme de l'artère pulmonaire gauche (diamètre maximal de 4,2 cm) et de l'hypertrophie ventriculaire droite. Les turbulences au-dessus de la valve sont visualisées sous la forme d'une zone vide de signal. Un second plan de coupe perpendiculaire est programmé juste au-dessus du plan valvulaire, au niveau de la partie rétrécie du jet (ligne noire). **b.** Dans ce plan, les coupes de ciné-IRM montrent la restriction à l'ouverture de la valve pulmonaire (flèche blanche continue). **c.** La séquence de cartographie des vitesses dans le même plan permet de mesurer le pic de vitesse maximale à 2,8 m/s au sein de la zone indiquée par la flèche blanche discontinue.

■ Les différentes cardiopathies congénitales chez l'adulte

Dans la majorité des cas, la cardiopathie congénitale est diagnostiquée pendant l'enfance et l'IRM cardiovasculaire est utilisée pour la surveillance de patients chez lesquels un diagnostic précis est connu.

Communication interventriculaire

Les communications interventriculaires (CIV) sont les shunts cardiaques congénitaux les plus fréquents. Certaines CIV sont de petits shunts sans signification hémodynamique, d'autres de volumineux shunts associés à de multiples anomalies cardiaques, comme dans le cadre de la tétralogie de Fallot. L'IRM cardiovasculaire est une modalité complémentaire à l'échocardiographie pour l'évaluation des CIV simples ou complexes. L'IRM cardiaque permet la visualisation du shunt dans les trois plans de l'espace et des rapports shunt aux structures de voisinage. Elle permet de chercher des anomalies cardiaques associées et les conséquences fonctionnelles du shunt, ainsi que de quantifier les dimensions du shunt et ses conséquences sur le ventricule droit et l'artère pulmonaire. Les images en écho de spin dont le plan est perpendiculaire à l'axe du shunt permettent une évaluation anatomique de bonne qualité. Les séquences en ciné-IRM montrent une zone vide de signal au sein du ventricule droit, due au flux turbulent à travers le shunt, et permettent d'analyser la forme et les dimensions de la CIV (figure 7.3). L'importance du shunt peut être calculée de deux manières : par la comparaison du flux pulmonaire au flux systolique ($Q_p : Q_s$) estimée par les séquences de cartographie des vitesses (figure 7.4) ou par la comparaison des

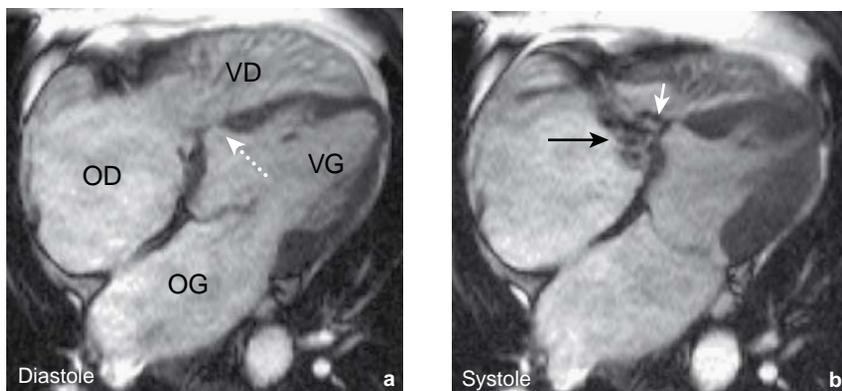


Figure 7.3 Coupe ciné-IRM en quatre cavités chez un homme de 65 ans chez lequel on suspecte une communication anormale entre le ventricule gauche et l'oreillette droite. **a.** Une petite CIV musculaire est visualisée (flèche blanche discontinue). **b.** La zone de flux anormal est visualisée au sein du ventricule droit (flèche blanche continue) et non au sein de l'oreillette droite. L'insuffisance tricuspide associée (flèche noire) est à l'origine d'une dilatation de l'oreillette droite. Il faut noter qu'il existe un aspect qui peut faire évoquer une CIA, qui est en fait la conséquence de l'obliquité du plan de coupe et de l'hypertrophie ventriculaire droite.

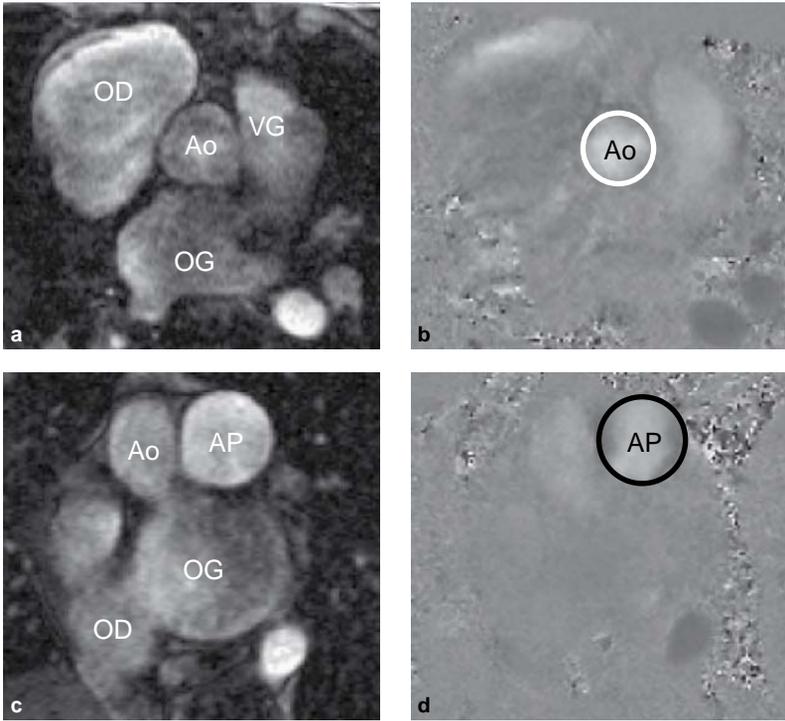


Figure 7.4 Calcul du rapport $Q_p : Q_s$ pour la CIV montrée en [figure 7.3](#) en se servant de séquences de cartographie des vitesses. **a,b.** Séquences sagittales obliques réalisant une coupe transversale de l'aorte ascendante en image de magnitude (**a**) et en image en contraste de phase (**b**) sur les séquences de cartographie des vitesses. Ce plan de coupe a été programmé à partir des séquences ciné-IRM en incidence chambre de chasse du ventricule gauche en positionnant la coupe perpendiculaire à l'aorte juste au-delà de la valve aortique. **c,d.** Plan de coupe transversal oblique de l'artère pulmonaire initiale en image de magnitude (**c**) et en image de contraste de phase (**d**). Le plan de coupe a été programmé à partir de séquences en ciné-IRM chambre de chasse du ventricule droit, en se positionnant de façon perpendiculaire et juste au-delà de la valve pulmonaire. Le flux au sein de l'aorte (cercle blanc) et au sein de l'artère pulmonaire (cercle noir) est calculé sur l'ensemble du cycle cardiaque. Les résultats obtenus sont de 5 et 9,2 l/min respectivement à l'origine d'un $Q_p : Q_s$ de 1,8. Il faut noter que le rapport $Q_p : Q_s$ peut être surestimé s'il existe une insuffisance tricuspide sévère.

fractions d'éjection ventriculaire droite et ventriculaire gauche, calculée à partir de coupes ciné-IRM petit axe.

Les points spécifiques qui doivent figurer au sein du compte rendu sont :

1. la description anatomique;
2. la quantification des dimensions du shunt;
3. l'existence d'anomalies cardiaques associées, telles que d'autres cardiopathies congénitales complexes ou une hypertension artérielle pulmonaire.

Communication interauriculaire

Il existe trois variétés de communications interauriculaires (CIA) qui toutes peuvent être découvertes à l'âge adulte. La CIA la plus fréquente est du type ostium secundum (75 % des cas) dans la région du foramen ovale. L'échocardiographie constitue l'imagerie de première intention. L'IRM cardiovasculaire est utilisée lorsque les résultats de l'échocardiographie sont incomplets. Elle permet d'identifier la communication anormale par la visualisation d'une zone vide de signal qui s'étend à partir de la CIA dans l'oreillette droite sur les séquences de ciné-IRM. L'IRM cardiaque permet d'analyser les dimensions du shunt, ses conséquences anatomiques et fonctionnelles, et de rechercher des anomalies associées du retour pulmonaire (figure 7.5).

En cas de CIA, les points qui doivent être abordés spécifiquement dans le compte rendu sont :

1. la description anatomique précise de la CIA et la faisabilité des techniques de fermeture ;
2. la quantification du shunt ;
3. l'existence d'anomalies cardiaques associées comme un retour veineux pulmonaire anormal et une hypertension artérielle pulmonaire.

Retour veineux pulmonaire anormal partiel, canal artériel et artères collatérales systémiques

L'IRM cardiovasculaire a un rôle essentiel pour la détection et le suivi des anomalies vasculaires artérielles et veineuses associées aux cardiopathies congénitales de l'adulte, telles que les retours veineux pulmonaires anormaux et les collatéralités systémiques. Dans ce cadre, la technique doit inclure une ARM qui permet une analyse anatomique précise des gros vaisseaux constituant un apport aux données du cathétérisme cardiaque (figure 7.6). Les séquences de cartographie des vitesses permettent d'évaluer l'importance des shunts. Des séquences en écho de spin sont particulièrement utilisées lorsqu'il existe des artéfacts d'origine métallique.

Le compte rendu doit inclure :

1. la description des retours veineux anormaux et des collatéralités systémiques ;
2. l'évaluation des shunts ;
3. l'existence d'autres anomalies telles que CIA ou hypertension artérielle pulmonaire.

Sténose pulmonaire, obstruction de la chambre de chasse du ventricule droit

Au contraire des CIA et des CIV, les obstructions intéressant l'artère pulmonaire et la chambre de chasse du ventricule droit sont généralement mal analysées en échocardiographie. L'IRM cardiovasculaire permet une analyse précise du niveau anatomique de l'obstruction ventriculaire droite en se servant de séquences en écho de spin et

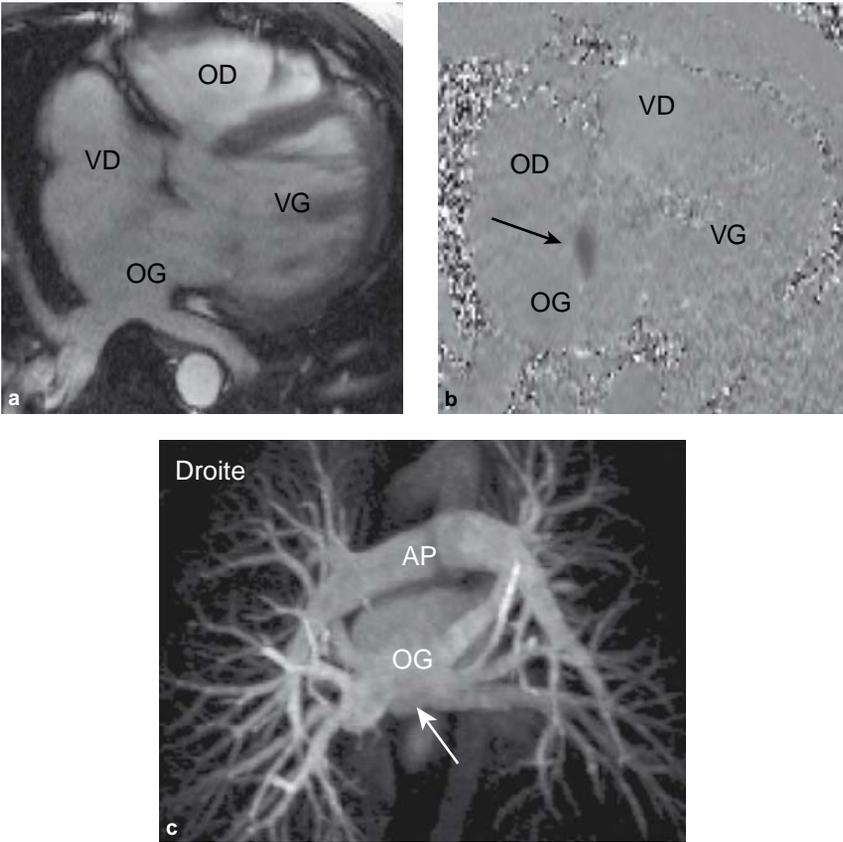


Figure 7.5 CIA de type ostium secundum caractérisée par un Qp : Qs de 2,2 obtenu par l'analyse des séquences de cartographie des vitesses au niveau de l'aorte et de l'artère pulmonaire, comme cela a été décrit pour la CIV de la figure 7.4. **a.** Les séquences de ciné-IRM dans le plan transversal permettent le positionnement des coupes destinées aux séquences de cartographie des vitesses. **b.** La séquence de cartographie des vitesses permet la visualisation du flux anormal de l'oreillette gauche à l'oreillette droite sous la forme d'une zone vide de signal (flèche noire) et la reconstruction en mode maximum intensity projection (MIP) de l'ARM (**c**) autorisent une analyse précise de la vascularisation artérielle pulmonaire et permet d'éliminer l'existence d'un retour veineux pulmonaire anormal. À noter qu'il existe deux veines pulmonaires droites et trois veines pulmonaires gauches.

de séquences en mode ciné-IRM. Les coupes dans le plan transversal sont utiles pour l'analyse fonctionnelle des communications anormales ventriculopulmonaires. Les séquences de cartographie des vitesses permettent d'évaluer l'importance des sténoses ou des régurgitations. Elles peuvent être programmées à un niveau valvulaire, au sein de l'artère pulmonaire ou au sein des branches de l'artère pulmonaire (figure 7.7). L'ARM permet une analyse anatomique de bonne qualité de la vascularisation artérielle pulmonaire.

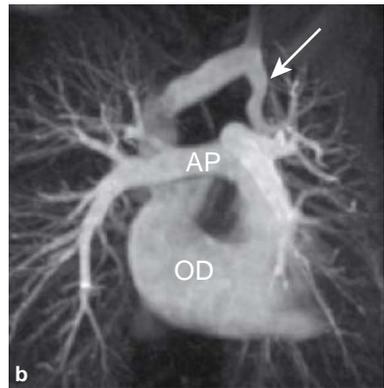
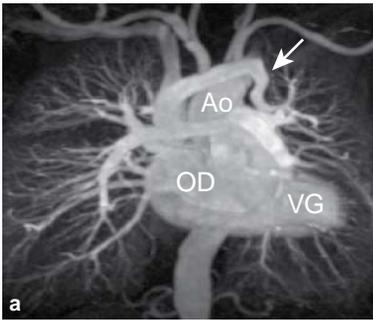


Figure 7.6 Deux angiographies par résonance magnétique reconstruites en mode MIP chez une femme de 63 ans présentant un retour veineux pulmonaire anormal caractérisé par une veine pulmonaire supérieure gauche qui se draine au sein du tronc veineux innominé gauche (flèches blanches). Le calcul du rapport $Q_p : Q_s$ dans ce cas était de 1,4 sans argument en faveur d'une dysfonction ventriculaire droite ou d'une hypertension artérielle pulmonaire.

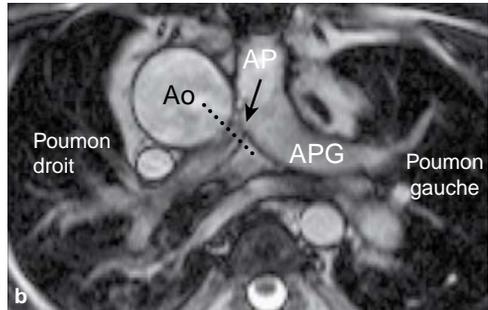
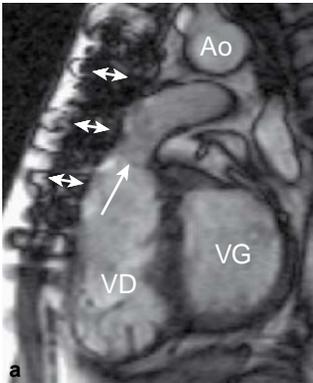


Figure 7.7 Coupe en ciné-IRM d'un homme de 28 ans présentant un tronc artériel commun. Ce patient a bénéficié d'une réparation dite de Rastelli (tube faisant communiquer la paroi antérieure du ventricule droit et l'artère pulmonaire, associée à une fermeture de la CIV) à l'âge de 3 ans. Le tube a été remplacé 4 ans avant l'IRM cardiovasculaire. **a.** La coupe dans l'incidence chambre de chasse du ventricule droit montre le fonctionnement normal du tube, sans sténose ou régurgitation significative (flèche blanche). Les artefacts en rapport avec les fils sternaux sont visualisés (flèches blanches à double tête). **b.** Dans le plan transversal intéressant la bifurcation de l'artère pulmonaire en branche droite et branche gauche, une sténose de l'origine de la branche droite de l'artère pulmonaire avec une hypoplasie distale et la mise en évidence (flèche noire continue) d'une zone vide de signal au sein de l'artère pulmonaire droite proximale traduisent l'existence de turbulences à ce niveau. Une séquence de cartographie des vitesses a ensuite été réalisée dans un plan perpendiculaire (ligne noire discontinue). Le pic de vitesse maximale était de 2,4 m/s, ce qui confirme l'existence d'une sténose significative de la branche droite de l'artère pulmonaire.

Persistence du canal artériel et shunt aortopulmonaire

La persistance du canal artériel correspond à une communication artérielle persistante située entre l'origine de l'artère pulmonaire gauche et l'aorte thoracique descendante juste au-delà de l'origine de l'artère sous-clavière gauche. Chez l'adulte, il s'agit généralement d'une malformation isolée. L'existence d'un flux circulatoire au sein d'un canal artériel persistant peut être démontrée en ciné-IRM sous la forme de zones de turbulences au sein du réseau artériel pulmonaire (figure 7.8). L'IRM cardiaque permet la quantification des dimensions du shunt et la recherche de signes d'hypertension artérielle pulmonaire avant la prise de décision de fermeture du shunt anormal.

On entend par « shunt aortopulmonaire » la communication entre l'aorte thoracique ascendante et l'artère pulmonaire. Les coupes en mode ciné-IRM permettent de le distinguer de la persistance du canal artériel.

Maladie d'Ebstein

Le diagnostic de maladie d'Ebstein est généralement réalisé en échocardiographie. L'IRM cardiovasculaire permet de préciser les anomalies anatomiques et d'identifier les anomalies nécessitant une réparation chirurgicale (figure 7.9). La position trop antérieure des feuillets valvulaires tricuspides est bien visualisée sur les coupes long axe, les coupes ciné-IRM petit axe permettent d'analyser les modifications du feuillet antérieur de la valve tricuspide et le degré de dysplasie valvulaire. Elles sont également utilisées pour l'analyse fonctionnelle et volumétrique du ventricule droit et



Figure 7.8 Coupe ciné-IRM sagittale oblique d'une femme de 71 ans présentant un syndrome d'Ehlers-Danlos et une persistance du canal artériel visualisée sous la forme d'une zone vide de signal s'étendant de l'aorte au sein de l'artère pulmonaire (flèche blanche).

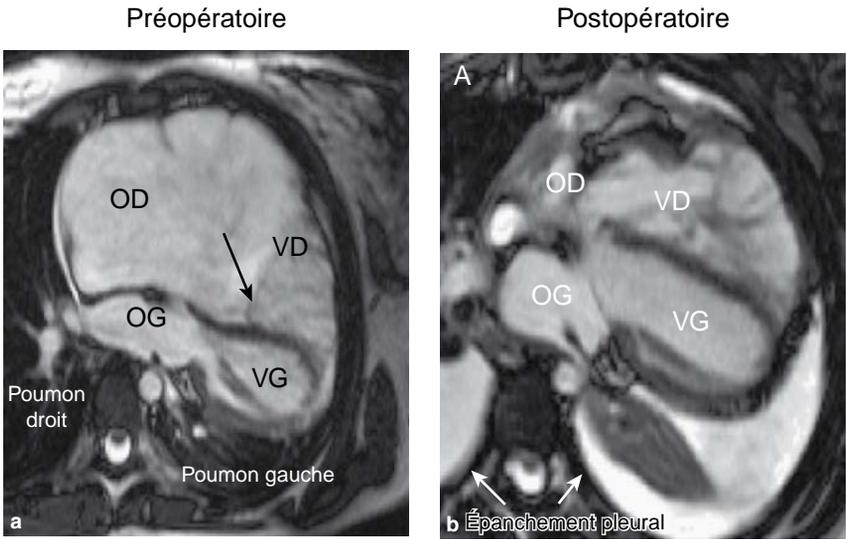


Figure 7.9 Évaluation pré- et postopératoire en mode ciné-IRM quatre cavités d'une jeune fille de 16 ans atteinte d'une maladie d'Ebstein sévère. **a.** Il existe un déplacement antérieur de 4 cm du feuillet septal de la valve tricuspide (flèche noire). L'oreillette droite et le ventricule droit sont dilatés. La fraction d'éjection du ventricule droit est de 45 %, en présence d'une importante régurgitation tricuspiddienne (fraction de régurgitation de 49 %). **b.** Surveillance postopératoire précoce (8^e jour). La réparation chirurgicale consistait en une réparation de la valve tricuspide, une plicature du ventricule droit, une cryoablation de l'oreillette droite, une fermeture de la CIA par un patch fenêtré avec mise en place d'un tube en Gore-tex® permettant un shunt droit/gauche nécessaire du fait de l'élévation des pressions auriculaires droites. La valve tricuspide fonctionnait correctement sans régurgitation tricuspiddienne et avec une sténose tricuspiddienne minime, caractérisée par une aire de 3 cm² et un pic de vélocité maximale de 1,2 m/s.

du ventricule gauche. Les séquences de cartographie des vitesses sont généralement utilisées pour analyser le degré de régurgitation tricuspiddienne. Elles peuvent aussi détecter une sténose tricuspiddienne. On se sert également des coupes en mode ciné-IRM et des coupes en cartographie des vitesses pour chercher une CIA associée.

Tétralogie de Fallot

La tétralogie de Fallot comprend une CIV, une obstruction de la chambre de chasse du ventricule droit, une hypertrophie ventriculaire droite et une dextroposition de l'aorte. La réparation chirurgicale implique la fermeture de la CIV et la résection de l'obstruction de la chambre de chasse du ventricule droit, mais on observe encore chez des patients plus âgés des techniques chirurgicales palliatives, telles que l'opération de Blalock-Taussig (shunt chirurgical entre l'artère sous-clavière et l'artère pulmonaire).

La correction de l'obstruction de la chambre de chasse du ventricule droit est à l'origine d'une régurgitation pulmonaire importante qui doit être régulièrement

surveillée. Les autres complications postopératoires, telles que la formation d'un pseudoanévrisme au niveau de la chambre de chasse du ventricule droit et la dilatation de la crosse de l'aorte, ainsi que d'éventuelles autres anomalies congénitales associées telles qu'une crosse aortique droite, des anomalies d'origine des artères coronaires, peuvent être visualisées en IRM cardiovasculaire.

La réalisation de coupes petit axe permet l'évaluation quantitative des paramètres fonctionnels biventriculaires et permet de rechercher des communications anormales persistantes. La comparaison des fractions d'éjection ventriculaires droites et gauches sur les séquences de cartographie des vitesses permet d'évaluer l'importance de la régurgitation pulmonaire. Les séquences de ciné-IRM et les séquences de cartographie des vitesses au niveau de la chambre de chasse du ventricule droit de l'artère pulmonaire et des branches droite et gauche de l'artère pulmonaire permettent la recherche de sténoses associées. Les sténoses des branches droite et gauche de l'artère pulmonaire peuvent être la conséquence des modifications anatomiques provoquées par la correction chirurgicale, notamment dans les procédures de Pott (aorte descendante à artère pulmonaire) ou de Waterson (aorte ascendante à artère pulmonaire ou à branche droite de l'artère pulmonaire); ces procédures peuvent également être à l'origine d'aggravation de la régurgitation pulmonaire. L'évaluation des shunts résiduels est importante du fait des risques d'hypertension artérielle pulmonaire, en rapport avec l'augmentation du flux artériel pulmonaire.

Il est fréquent d'observer un rehaussement tardif au sein du ventricule droit et du ventricule gauche après la correction d'une tétralogie de Fallot. Il s'agit de signes péjoratifs permettant de prévoir la survenue de dysfonctions ventriculaires. La constatation de rehaussement tardif au sein du ventricule droit peut notamment faire craindre la survenue de troubles du rythme (figure 7.10).

La surveillance régulière à l'aide de l'IRM cardiaque permet d'évaluer l'efficacité du traitement médical et de déterminer la nécessité de reprise chirurgicale de la valve pulmonaire.

Les points spécifiques à aborder en cas de tétralogie de Fallot sont :

1. l'évaluation anatomique et fonctionnelle des réparations chirurgicales précédentes (réparation chirurgicale ou mise en place de shunt);
2. la quantification de la régurgitation pulmonaire et de la régurgitation aortique lorsqu'elle existe;
3. la description d'anomalies congénitales associées;
4. l'existence et le type de rehaussement tardif.

Transposition corrigée des gros vaisseaux

Dans la transposition des gros vaisseaux, l'aorte naît du ventricule droit et l'artère pulmonaire du ventricule gauche. La majorité des adultes survivant à une transposition des gros vaisseaux ont eu une réparation chirurgicale dans l'enfance, soit par ablation du septum interauriculaire et mise en place d'une pièce péricardique (opération de Mustard), soit par réfection de la paroi auriculaire (opération de Senning) pour redistribuer le flux auriculaire en laissant en place les jonctions ventriculoartérielles

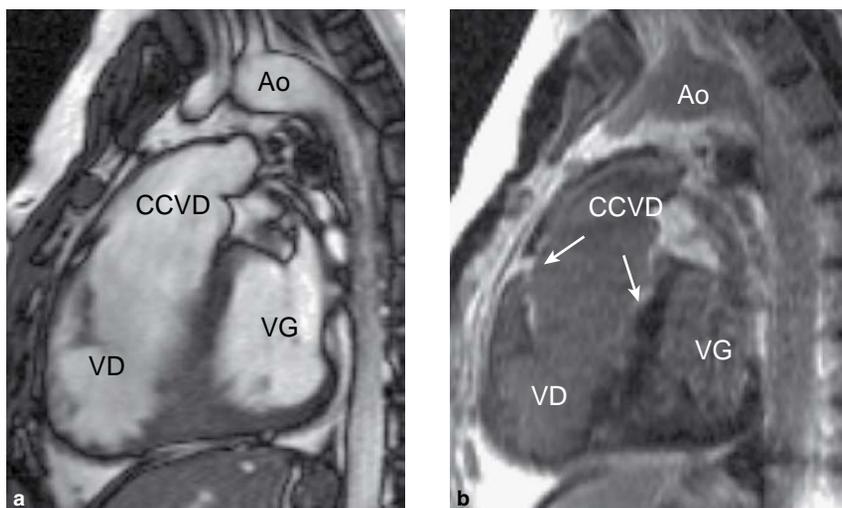


Figure 7.10 **a.** Coupe ciné-IRM passant par la chambre de chasse du ventricule droit (CCVD). **b.** Séquence tardive après injection de produit de contraste dans le même plan chez un homme de 27 ans présentant une tétralogie de Fallot corrigée. Cette dernière coupe montre des zones de rehaussement de la paroi libre et de la paroi septale du ventricule droit (flèches blanches).

transposées. L'objectif principal de l'imagerie postopératoire est l'évaluation des flux veineux systémique et pulmonaire (figure 7.11). L'IRM cardiaque permet le diagnostic des sténoses et des fuites de la pièce péricardique en se servant du caractère tridimensionnel de la méthode qui permet une évaluation anatomique et fonctionnelle. Les séquences de ciné-IRM sont réalisées pour rechercher les conséquences de sténoses visualisées sous la forme de zones vides de signal en rapport avec les flux turbulents. Les séquences de cartographie des vitesses ont pour objectif l'identification des vitesses circulatoires supérieures à 1 m/s, qui sont la traduction d'une obstruction circulatoire au niveau des oreillettes. Parallèlement, la dilatation du système veineux azygos et hémiazygos constitue un indicateur, permettant le diagnostic des obstructions veineuses systémiques.

L'analyse ciné-IRM de la fonction ventriculaire droite est importante chez ces patients, puisqu'ils sont exposés au risque d'insuffisance ventriculaire droite et que les régurgitations tricuspides et les régurgitations aortiques doivent être quantifiées lorsqu'elles sont présentes. L'existence d'un rehaussement tardif des parois du ventricule droit est fréquente chez les adultes après les procédures de Mustard et de Senning et le degré d'atteinte du ventricule droit est corrélé avec la dysfonction ventriculaire et l'existence de troubles du rythme. Les patients qui ont bénéficié d'une transposition artérielle doivent être évalués à la recherche de sténose pulmonaire supralvalvulaire, de sténose aortique ou de sténose des artères pulmonaires droites et gauches. Ces patients sont également exposés au risque de sténose artérielle

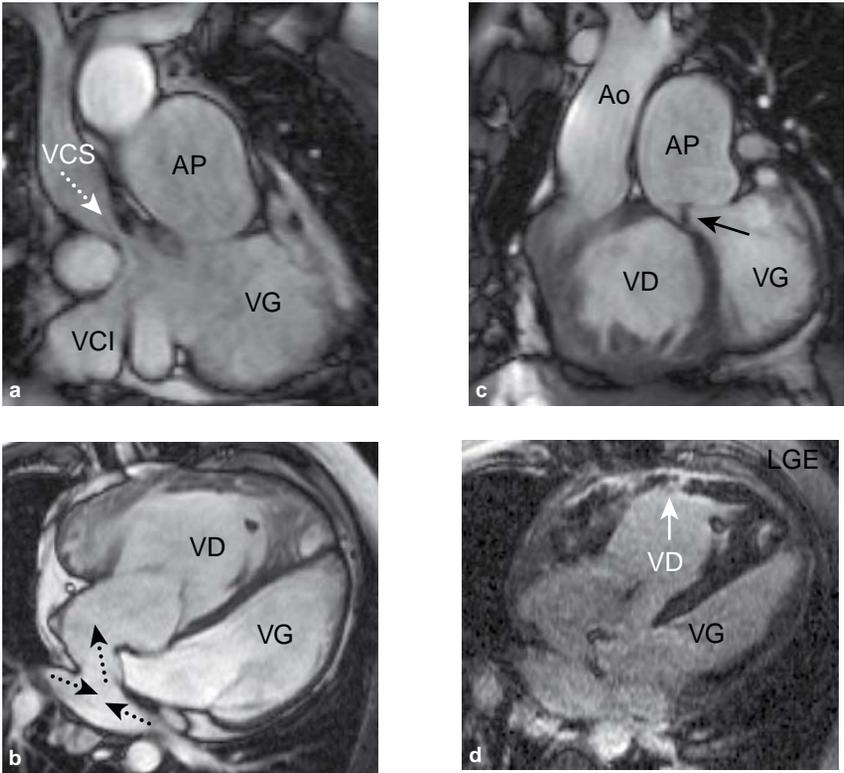


Figure 7.11 IRM cardiaque d'un homme de 30 ans ayant bénéficié d'une opération de Mustard pour transposition des gros vaisseaux à l'âge de 2 mois. **a.** Les séquences de ciné-IRM du versant veineux systémique montrent un rétrécissement de la terminaison de la veine cave supérieure (flèche blanche discontinue) et une veine cave inférieure perméable. Les vitesses circulatoires des veines caves supérieure et inférieure ont été mesurées à 1,2 et 1 m/s respectivement en séquence de cartographie des vitesses. **b.** La séquence de ciné-IRM du flux veineux pulmonaire vérifie qu'il n'existe pas de sténose (flèche noire) et les séquences de ciné-IRM de la chambre de chasse montrent une hypertrophie ventriculaire droite et une régurgitation pulmonaire (flèches noires discontinues). **d.** Un rehaussement tardif est visualisé au niveau de la paroi libre du ventricule droit (flèche blanche continue).

coronaire ostiale, au niveau du site de la réimplantation coronaire ; on peut pour cela se servir de l'ARM coronaire.

En cas de correction congénitale de transposition des gros vaisseaux, les oreillettes sont en situation normale, de même que le retour veineux, mais il existe une transposition atrioventriculaire associée à la transposition des gros vaisseaux. L'IRM cardiaque permet d'identifier les caractéristiques anatomiques de chacune des oreillettes et de chacun des ventricules, la malposition cardiaque, les anomalies congénitales associées, telles que les CIV, les sténoses pulmonaires, valvulaires ou supra-valvulaires, les malformations tricuspidiennes, comparables à celles qu'on observe en cas de

maladie d'Ebstein. L'analyse de la fonction du ventricule droit exposé à l'insuffisance ventriculaire est indispensable avant d'envisager une double réparation chirurgicale (Senning et transposition artérielle).

Le compte rendu doit inclure :

1. l'évaluation anatomique et fonctionnelle des flux veineux pulmonaires et systémiques ;
2. la quantification des régurgitations tricuspides et des régurgitations aortiques quand elles existent ;
3. la description des anomalies congénitales ou iatrogènes associées ;
4. l'existence et le type d'anomalie du rehaussement tardif.

Ventricule unique et opération de Fontan

Chez les patients porteurs de ventricule unique, l'opération de Fontan a pour objectif de rediriger le flux veineux systémique directement vers les artères pulmonaires en laissant au ventricule la fonction de redistribuer le sang oxygéné au sein de la circulation systémique. Le flux circulatoire pulmonaire est directement dépendant des élévations de pression au sein des veines systémiques et toute obstruction au flux circulatoire, comme en cas de thrombus, est à l'origine d'une défaillance circulatoire. À l'heure actuelle, la réparation chirurgicale repose sur la réalisation d'une connexion complète cavopulmonaire par le biais d'un shunt auriculaire ou d'un shunt extracardiaque. L'IRM cardiovasculaire est indispensable pour l'évaluation de ces shunts chirurgicaux, puisque l'échocardiographie est généralement limitée par la situation rétrosternale de ces montages. En ciné-IRM, l'analyse de ces shunts permet d'identifier une éventuelle obstruction, visualisée sous la forme de zones vides de signal en rapport avec les turbulences circulatoires. C'est également en ciné-IRM que l'on recherche des arguments en faveur d'une thrombose auriculaire droite qui peut être ultérieurement confirmée ou réfutée en se servant de l'injection de produit de contraste (figure 7.12). Les séquences de ciné-IRM peuvent également analyser les veines pulmonaires afin de rechercher une compression postopératoire, lorsqu'on met en évidence des vitesses circulatoires supérieures à 1 m/s au moment de la systole auriculaire, qui doivent faire suspecter une obstruction. Les coupes ciné-IRM petit axe permettent d'analyser la fonction univentriculaire, puisqu'on ne peut analyser qu'une fraction d'éjection. L'analyse quantitative des régurgitations valvulaires auriculoventriculaires repose sur les séquences de cartographie des vitesses au niveau de l'aorte et de l'artère pulmonaire.

Les points spécifiques qui doivent être analysés pour l'analyse d'une procédure de Fontan sont :

1. l'analyse des retours caves, de l'oreillette droite, de shunt auriculopulmonaire, et des artères pulmonaires ;
2. la recherche d'un thrombus auriculaire droit ;
3. la recherche d'une compression veineuse pulmonaire ;
4. la quantification des régurgitations valvulaires auriculoventriculaires.

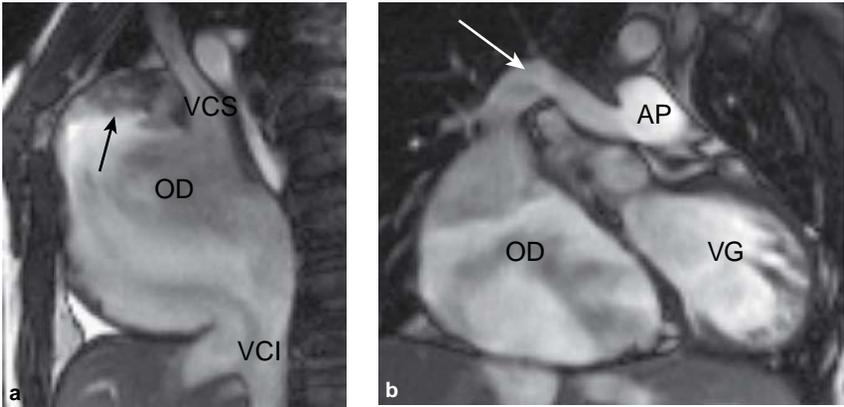


Figure 7.12 Image ciné-IRM d'un homme de 22 ans après réparation selon Fontan. **a.** L'analyse du retour veineux dans un plan quasi sagittal montre des veines caves supérieure et inférieure perméables. Il existe une dilatation marquée de l'oreillette droite, caractérisée par la présence de flux ralenti qui se manifeste sous la forme de zones de bas signal, associées à un thrombus partiel (flèche noire). **b.** L'analyse du shunt auriculopulmonaire dans un plan quasi frontal montre un shunt perméable de l'oreillette droite jusqu'à l'artère pulmonaire (flèche blanche). Comme précédemment, le ralentissement du flux au sein de l'oreillette droite se manifeste sous la forme de zones de bas signal.

■ Indications

L'IRM cardiovasculaire peut :

1. diagnostiquer, évaluer et surveiller les pathologies cardiovasculaires congénitales complexes, ce qui permet souvent d'éviter le cathétérisme cardiaque ;
2. être à l'origine d'une imagerie reproductible pour la surveillance régulière de ces pathologies et notamment pour l'évaluation du ventricule droit ;
3. diagnostiquer et évaluer les retours veineux pulmonaires et les collatéralités aortopulmonaires majeures ;
4. analyser la valve pulmonaire et quantifier une éventuelle régurgitation ou une sténose ;
5. analyser les artères et les veines pulmonaires ;
6. analyser la perméabilité des shunts intra- et extracardiaques.

L'IRM cardiovasculaire ne peut pas :

1. être utilisée comme une modalité de dépistage du fait de sa disponibilité insuffisante ;
2. être considérée comme une modalité d'imagerie supérieure à l'échocardiographie pour l'analyse de la plupart des CIV et des CIA simples.

Angiographie par résonance magnétique

Ilse Crevits

■ Introduction

Les récentes améliorations en IRM cardiaque ont concerné le hardware, notamment pour ce qui est des gradients plus puissants caractérisés par des vitesses d'ascension plus rapides, et les logiciels (software), avec les nouvelles techniques d'impulsion et les techniques d'angiographie par résonance magnétique (ARM) ultrarapides. De fait, l'ARM constitue aujourd'hui la modalité de référence pour l'évaluation des affections vasculaires. Les séquences utilisées en ARM sont des séquences d'écho de spin en haute résolution, des séquences d'écho de gradient et des séquences d'ARM ultrarapides après injection de gadolinium.

■ Technique d'angiographie par résonance magnétique

Angiographie par résonance magnétique avec injection de produit de contraste

La séquence de base en ARM avec injection est une séquence en écho de gradient tridimensionnelle utilisant une lecture centrale du plan de Fourier afin d'améliorer la résolution en contraste. L'injection de gadolinium est à l'origine d'une diminution du T1 du sang dont le signal est hyperintense quels que soient les vitesses ou le mode circulatoire (figure 8.1).

La synchronisation correcte de l'acquisition des images au rehaussement des vaisseaux est primordiale pour obtenir des images de qualité. On se sert généralement de techniques de repérage du bolus (bolus-tracking) par l'utilisation d'une séquence bidimensionnelle fluoroscopique en temps réel qui permet de visualiser l'arrivée du produit de contraste au sein des gros vaisseaux et de synchroniser alors le début de l'acquisition de la séquence d'angiographie tridimensionnelle haute résolution. Il faut tenir compte du délai minimum imposé entre les deux séquences. Une autre méthode de synchronisation est la réalisation d'une injection test d'un bolus de

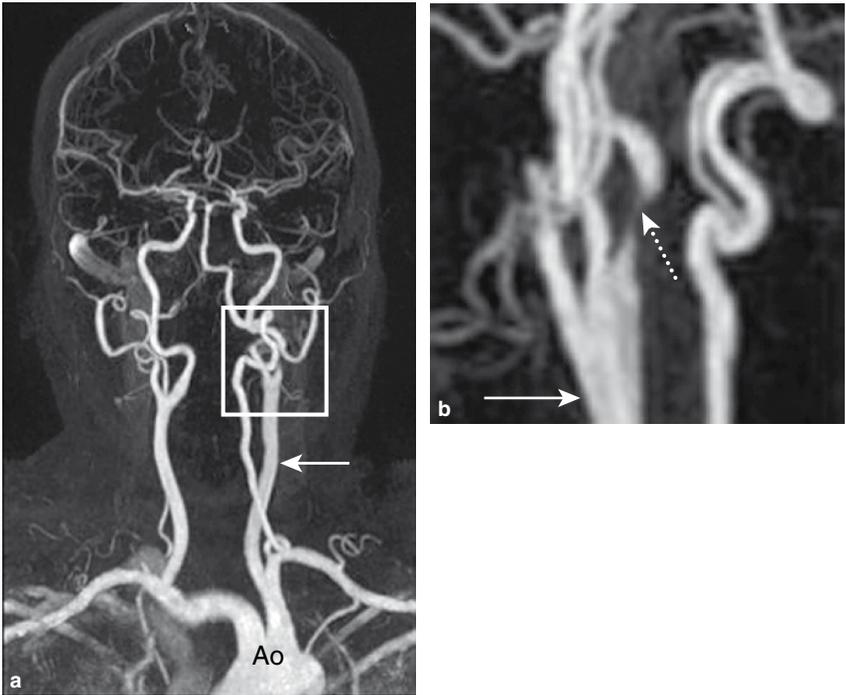


Figure 8.1 Angiographie par résonance magnétique après injection des artères carotides. **a.** Reconstruction en mode maximum intensity projection (MIP). Il existe une sténose carotidienne post-bulbaire au niveau de l'artère carotide interne gauche (carré blanc, artère carotide primitive gauche; flèche blanche). L'agrandissement de la reconstruction tridimensionnelle MIP montre une sténose serrée localisée de la carotide interne gauche (flèche blanche discontinue).

gadolinium afin de calculer le temps d'arrivée du bolus ou encore d'utiliser une série consécutive d'acquisitions très rapides qui permettent d'analyser le rehaussement de façon dynamique.

Séquences temps de vol (2D ou 3D)

Il s'agit de la technique d'écho de gradient, plus ancienne, pour laquelle on exploite la visualisation du signal du flux circulatoire par l'analyse du phénomène d'entrée dans le plan de coupe. On réalise une saturation des tissus stationnaires par l'application d'impulsions de saturation à répétition. Dans ces conditions, il existe un contraste de bonne qualité entre le flux circulant qui entre dans le plan de coupe et les tissus de voisinage qui sont complètement saturés et donc à l'origine d'une absence de signal. Les flux veineux peuvent être supprimés par l'application de bandes de présaturation. Les techniques de temps de vol sont intrinsèquement sensibles aux vitesses circulatoires. Ainsi, les vitesses circulatoires plus basses au contact de la paroi

des vaisseaux ont un signal moins élevé que le flux circulant au milieu du vaisseau. Les séquences temps de vol 2D sont caractérisées par une surestimation des sténoses vasculaires du fait des phénomènes de déphasage. Ces artéfacts de déphasage sont beaucoup moins marqués en 3D.

■ Techniques de post-traitement

Différents algorithmes de post-traitement sont utilisés pour reconstruire des images tridimensionnelles. Dans tous les cas, les reconstructions vasculaires doivent être interprétées en même temps que les images natives (données brutes) afin de ne pas interpréter de façon abusive les artéfacts induits par les algorithmes de post-traitement (figure 8.2).

Maximum intensity projection

Pour se servir de cet algorithme de reconstruction MIP, on sélectionne le plan de vue et l'algorithme de reconstruction extrait les voxels et les pixels à l'origine d'un signal maximal. On peut se servir des reconstructions en mode MIP avec des séquences temps de vol comme avec les séquences d'ARM avec injection. Dans les deux cas, il existe une tendance à surestimer le degré des sténoses artérielles (figure 8.2b).

Technique de rendu volumique et de reconstruction surfacique

Avec ces techniques, l'algorithme sélectionne les images reconstruites en se servant d'une technique de seuillage qui permet d'obtenir une représentation tridimensionnelle vasculaire. Comme en MIP, les techniques de rendu volumique (*volume rendering technique* [VRT]) et de reconstruction surfacique (*shaded surface display*) ont tendance à surestimer le degré de sténose artérielle (figure 8.2c).

Reconstruction multiplanaire courbe

Les techniques de reconstruction multiplanaire courbe permettent d'obtenir des images dans des plans différents de ceux qui sont utilisés pour l'acquisition des images natives (figure 9.3). Ces séquences sont particulièrement adaptées aux séquences tridimensionnelles, avec acquisition de voxels isotropiques pour lesquels la résolution spatiale est la même dans tous les plans de l'espace.

■ Les différents systèmes artériels

Artères carotides

Les séquences les plus utilisées pour l'ARM carotidienne sont des séquences temps de vol et des séquences d'ARM avec injection (figure 8.1). Lorsqu'il est nécessaire d'obtenir une représentation de la crosse de l'aorte et des troncs supra-aortiques, seule l'ARM avec injection permet l'obtention de résultats de qualité. L'ARM, en temps de vol ou après injection, constitue aujourd'hui une méthode aussi fiable que l'angiographie conventionnelle. Pour la quantification des sténoses carotidiennes, compte

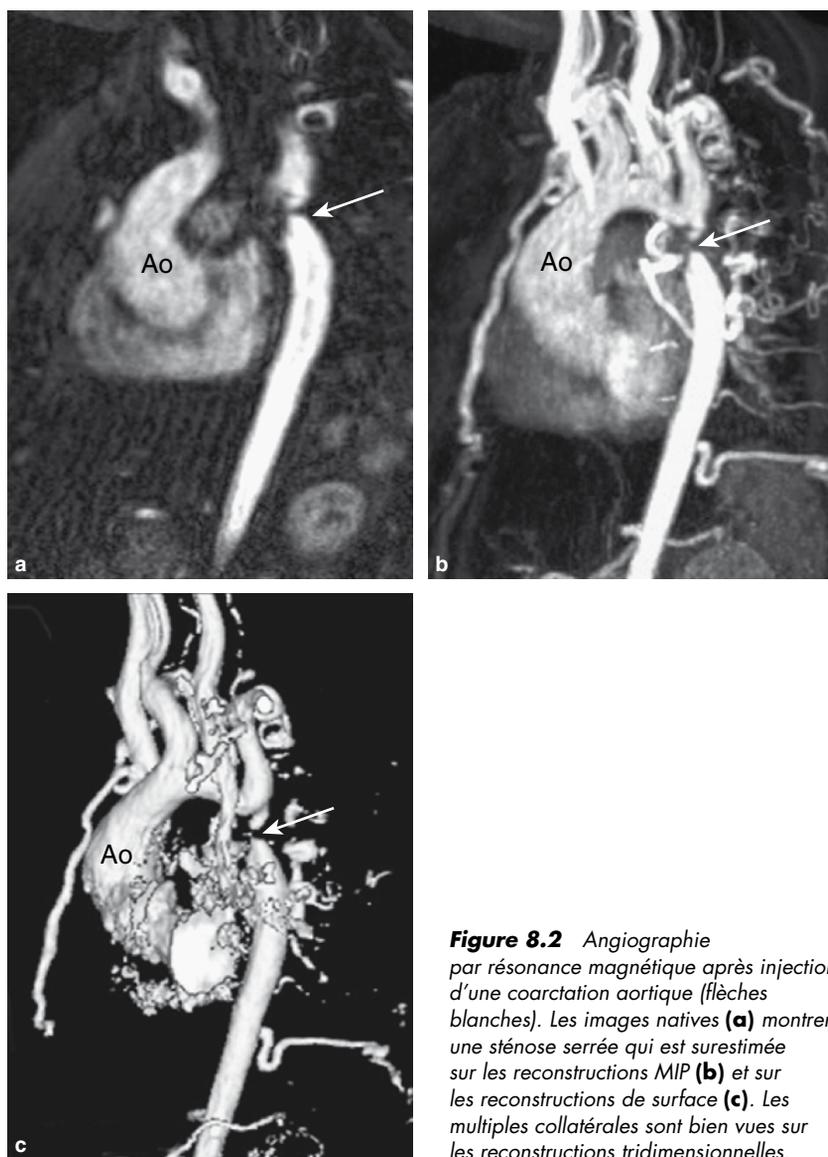


Figure 8.2 Angiographie par résonance magnétique après injection d'une coarctation aortique (flèches blanches). Les images natives (**a**) montrent une sténose serrée qui est surestimée sur les reconstructions MIP (**b**) et sur les reconstructions de surface (**c**). Les multiples collatérales sont bien vues sur les reconstructions tridimensionnelles.

tenu du caractère invasif de l'angiographie conventionnelle avec le risque d'accident vasculaire propre aux techniques invasives (0,5 à 1 % des cas), l'ARM constitue aujourd'hui la méthode de référence. L'interprétation doit prendre en compte les reconstructions, mais également les images natives afin d'éviter de surestimer le degré de sténose. Effectivement, les reconstructions MIP exagèrent les zones vides de signal et sont à l'origine d'une surestimation des sténoses parce que l'algorithme

choisit les voxels à l'origine du signal le plus élevé au sein des vaisseaux et au sein de l'environnement. Cette surestimation des sténoses en MIP est plus marquée en temps de vol qu'en angiographie avec contraste, sur laquelle le signal de l'environnement est plus efficacement supprimé.

L'ARM constitue une technique efficace pour le diagnostic de dissection carotidienne. La dissection carotidienne est la conséquence d'une hémorragie débutant au sein de la média qui s'étend parfois vers la couche adventitielle. Dans la majorité des cas, il n'existe pas de faux chenal circulant et on ne peut donc visualiser de flap intimal. L'angiographie reconstruite montre une sténose régulière ou irrégulière. Les images en écho de spin avec suppression de graisse permettent la visualisation directe de l'hématome carotidien.

L'ARM permet également l'analyse des sténoses des artères vertébrales ou du tronc basilaire. L'inversion de la direction circulatoire dans les artères vertébrales en cas de phénomène de vol sous-clavier est analysée en se servant de l'association de séquences d'ARM et de séquences de cartographie des vitesses après un exercice musculaire du membre supérieur. Il est également possible de confirmer l'inversion du flux circulatoire au sein des artères carotides en se servant de séquences d'ARM en temps de vol 2D en plaçant deux bandes de saturation.

En matière de pathologie carotidienne, le compte rendu doit inclure :

1. la description des sténoses carotidiennes ; la localisation précise, la longueur, la sévérité de la sténose ;
2. la recherche de pathologie vertébrale associée ;
3. l'analyse de la crosse de l'aorte et notamment des plaques athéromateuses.

Vaisseaux pulmonaires

Artères pulmonaires

L'IRM cardiovasculaire est une méthode efficace pour l'évaluation anatomique des artères pulmonaires et est notamment largement utilisée chez les patients porteurs de cardiopathie congénitale, chez lesquels il est indispensable d'obtenir une évaluation précise des dimensions, de la perméabilité, des relations anatomiques des artères pulmonaires, des veines pulmonaires et du ventricule droit. La technique est également utilisée de plus en plus fréquemment en cas d'hypertension artérielle pulmonaire (figure 8.3). En revanche, c'est l'angioscanner spiralé qui demeure la modalité de référence pour le diagnostic d'embolie pulmonaire, du fait des durées d'acquisition plus longues de l'ARM qui imposent une apnée plus longue et de la résolution spatiale de moindre qualité qui est gênante pour l'analyse des emboles distaux.

Veines pulmonaires

On a déjà abordé l'intérêt de l'IRM cardiovasculaire pour l'analyse des différentes formes de retour veineux pulmonaire anormal. Parallèlement, l'IRM cardiovasculaire peut être utilisée pour l'analyse des veines pulmonaires et de l'oreillette gauche avant ablation par radiofréquence dans le cadre des troubles du rythme

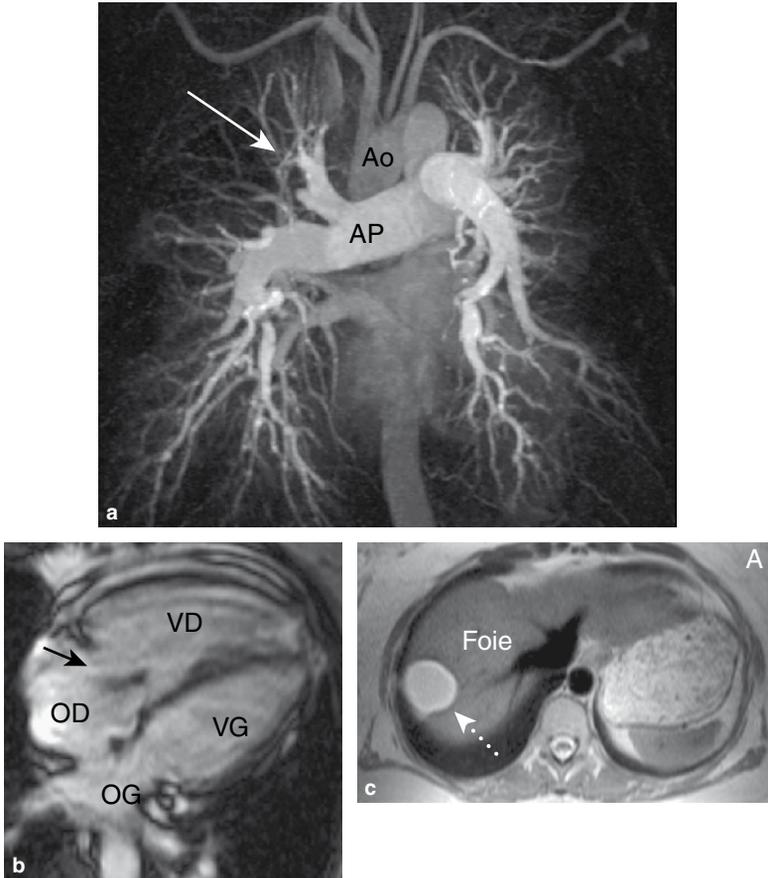


Figure 8.3 IRM cardiovasculaire chez une femme de 69 ans présentant une hypertension artérielle pulmonaire secondaire à un cœur pulmonaire chronique postembolique. **a.** La reconstruction MIP d'une ARM avec injection de contraste des artères pulmonaires montre l'obstruction proximale des artères lobaires supérieures droites et lobaires moyennes (flèche blanche continue). Il existe également de multiples sténoses distales, notamment au niveau des lobes inférieurs. **b.** Les coupes ciné-IRM montrent que le ventricule droit est dilaté avec une réduction de la fraction d'éjection à 34 % et qu'il existe une régurgitation tricuspide modérée (flèche noire). **c.** Découverte fortuite d'un kyste hépatique simple sur les coupes en écho de spin de repérage (flèche blanche discontinue).

cardiaque. L'analyse des sténoses veineuses pulmonaires se fait par des séquences d'ARM avec injection de contraste et par des séquences de cartographie des vitesses (figure 8.4).

L'ARM peut également être utilisée pour l'analyse des veines pulmonaires en cas de tumeur cardiaque ou de tumeur médiastinale pour rechercher une extension aux veines pulmonaires.

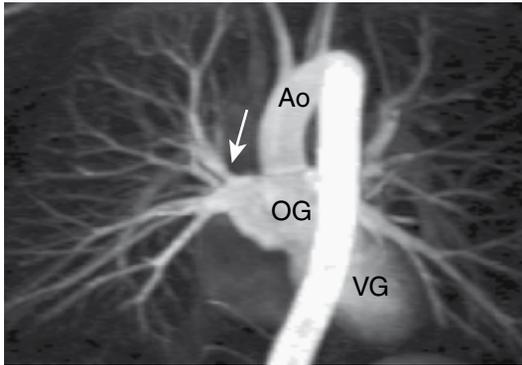


Figure 8.4 La reconstruction MIP d'une ARM avec injection chez un homme de 47 ans montre une sténose d'environ 50 % de la veine pulmonaire supérieure droite dans les suites d'une ablation par radiofréquence (flèche blanche).

En cas de pathologie veineuse pulmonaire, le compte rendu doit inclure :

1. une description anatomique précise ;
2. la recherche d'un retentissement cardiaque tel que les anomalies ventriculaires droites dans le cadre des cardiopathies congénitales et de l'hypertension artérielle pulmonaire ;
3. l'analyse anatomique précise des veines pulmonaires pour les patients chez lesquels on envisage une ablation par radiofréquence.

Artères rénales et mésentériques

L'ARM constitue une méthode efficace pour l'analyse des artères rénales, notamment en cas d'hypertension rénovasculaire d'origine athéromateuse, mais également quand on suspecte une dysplasie fibromusculaire.

Le protocole complet d'une IRM cardiovasculaire pour hypertension artérielle inclut les séquences suivantes :

- analyse cardiaque et évaluation quantitative des volumes ventriculaires gauches, de la fonction et de la masse myocardique ;
- recherche d'une coarctation aortique ;
- analyse des surrénales ;
- ARM avec injection de produit de contraste des artères rénales (figure 8.5).

L'ARM avec injection permet une analyse anatomique de bonne qualité des artères rénales principales et des artères rénales accessoires. Cependant, la résolution spatiale de l'IRM reste inférieure à celle de l'angiographie conventionnelle pour l'analyse de la distalité artérielle. Cette résolution spatiale sous-optimale constitue la dernière limite de l'IRM cardiovasculaire, notamment en cas de dysplasie fibromusculaire, où les artères rénales principales peuvent être normales avec une atteinte isolée de la

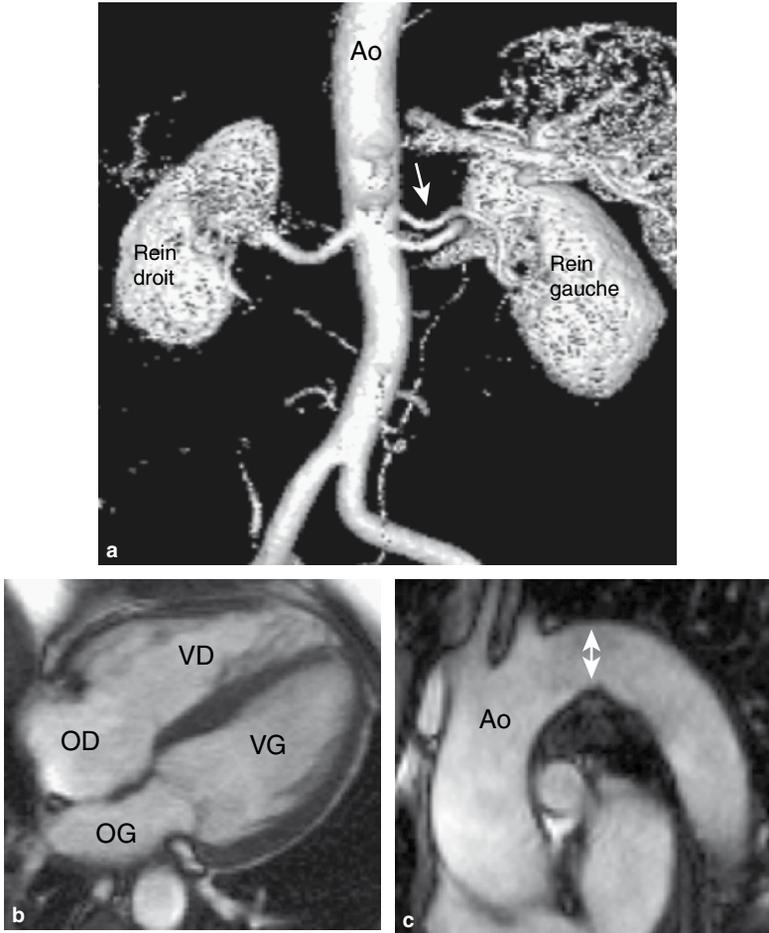


Figure 8.5 Bilan d'une hypertension artérielle chez un homme de 55 ans, réalisé en IRM cardiovasculaire. **a.** La reconstruction surfacique de l'angiographie rénale ne montre pas de sténose artérielle. Une artère rénale accessoire gauche est visualisée (flèche blanche). **b.** Les séquences ciné-IRM cardiaques montrent que le ventricule gauche est de taille et de volume normaux. La fonction ventriculaire est de bonne qualité. Il existe une minime hypertrophie ventriculaire gauche. **c.** Les séquences ciné-IRM dans un plan sagittal oblique permettent d'éliminer l'existence d'une coarctation aortique (double flèche blanche). Les glandes surrénales étaient normales et ne sont pas montrées sur la figure.

distalité artérielle. La dysplasie fibromusculaire est une cause beaucoup plus rare de sténose artérielle rénale que les lésions athéromateuses. La dysplasie fibromusculaire intéresse principalement des femmes jeunes et se manifeste plus souvent par une hypertension artérielle que par une insuffisance rénale. Dans sa forme caractéristique, il existe une atteinte de l'artère rénale principale sous la forme de sténoses multiples réalisant un aspect en pile d'assiettes. Au contraire, les lésions artérielles rénales

athéromateuses sont généralement observées chez des hommes plus âgés présentant d'autres localisations athéromateuses, une hypertension artérielle résistant au traitement et une insuffisance rénale associée. Il est important de souligner que le gadolinium constitue un agent de contraste qui n'est pas néphrotoxique. La localisation la plus fréquente des sténoses artérielles d'origine athéromateuse est ostiale, mais il peut exister des lésions multiples étagées. L'évaluation du degré de sténose se fait en analysant les reconstructions multiplanaires et les séquences de cartographie des vitesses.

L'expérience est moins importante pour l'évaluation du réseau artériel mésentérique en ARM. Les premiers résultats paraissent assez comparables à ceux de l'angiographie rénale. La technique paraît adaptée à l'analyse des sténoses proximales du tronc cœliaque ou de l'artère mésentérique supérieure. L'artère mésentérique inférieure est généralement moins bien analysée du fait de son petit calibre et du risque de surestimation des sténoses à ce niveau.

Le compte rendu, en cas d'ARM rénale, doit inclure :

1. l'anatomie rénale avec dimensions des reins et description de la différenciation corticomédullaire ;
2. l'anatomie artérielle et la description des sténoses ;
3. l'analyse complémentaire de la masse et de la fonction myocardique, en signalant l'absence de coarctation ou de pathologie surrénalienne associée.

Aorte

L'imagerie de l'aorte thoracique a été traitée au sein du chapitre 6. L'analyse optimale de l'aorte est effectuée par l'association de séquences en écho de spin et en écho de gradient afin d'analyser le contenant circulant, la paroi aortique et les tissus périaortiques. En cas de pathologie inflammatoire, comme dans les aortites, l'injection de produit de contraste a également pour intérêt de rechercher un rehaussement de la paroi. L'ARM permet également d'analyser la localisation et l'extension des anévrismes aortiques et de mesurer précisément le diamètre aortique (les mesures sont faites sur les images natives) [figure 8.6]. En cas de dissection aortique, lorsqu'il existe une extension à l'aorte abdominale, il est important de savoir si les efférences artérielles prennent origine du vrai ou du faux chenal. L'examen tomодensitométrique est généralement utilisé de première intention en cas de pathologie aiguë de l'aorte pour des raisons de disponibilité et de sécurité pour des malades instables. Au contraire, l'IRM cardiovasculaire constitue la modalité d'imagerie de référence pour la surveillance après traitement médical ou chirurgical.

En cas de pathologie de l'aorte abdominale, le compte rendu doit inclure :

1. une description anatomique précise de l'anévrisme et une orientation étiologique ;
2. l'existence d'un thrombus mural ou d'une dissection ;
3. l'atteinte des efférences artérielles, notamment des artères rénales et des artères iliaques.

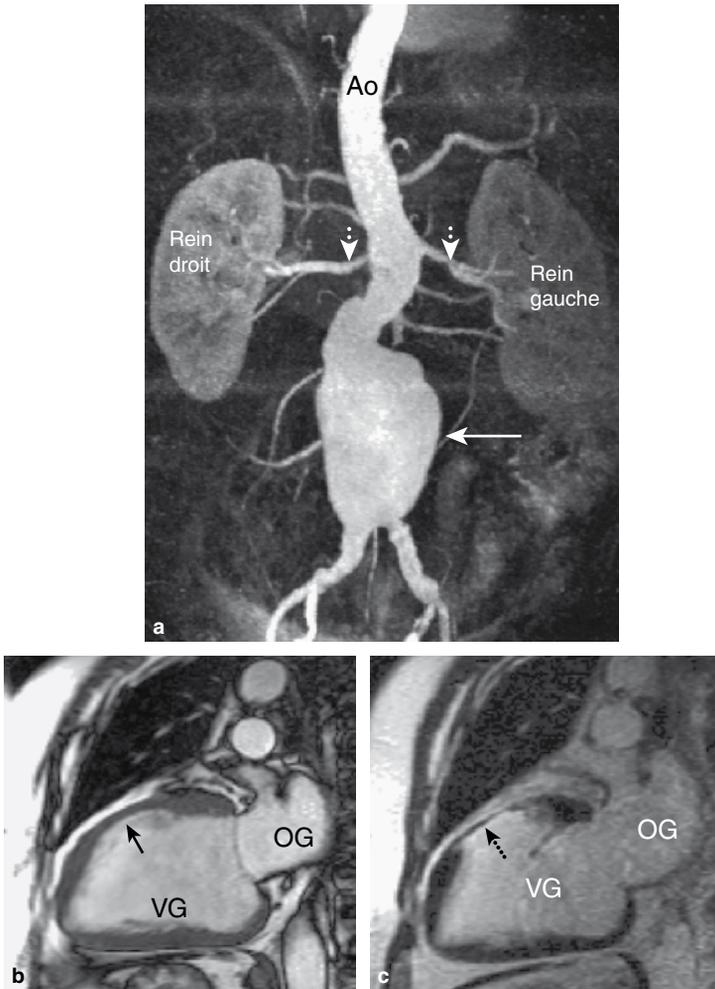


Figure 8.6 IRM cardiovasculaire d'un homme de 62 ans dans le cadre d'un bilan avant pontage coronarien, pour chercher la cause d'une insuffisance rénale chronique.

a. La reconstruction MIP d'une angiographie avec injection de contraste montre des lésions athéromateuses diffuses de l'aorte abdominale avec un volumineux anévrisme sous-rénal ($6,4 \times 7 \times 8,7$ cm) [flèche blanche continue]. L'anévrisme débute 4 cm en dessous de l'origine des artères rénales et présente un collet proximal qui mesure 2,5 cm de diamètre. L'origine des artères iliaques est intéressée par l'anévrisme (le thrombus mural était visualisé sur les séquences en écho de spin). Il existe une sténose peu serrée des artères rénales droites et gauches et les reins sont de taille normale. **b.** Sur les séquences de ciné-IRM, un amincissement médioantérieur de la paroi du ventricule gauche est visualisé sur la coupe deux cavités (flèche noire continue). **c.** À ce niveau, on observe un rehaussement quasi transmural indiquant le caractère non viable du myocarde à ce niveau (flèche noire discontinue).

Artères périphériques

L'ARM avec injection de contraste constitue une technique de référence pour analyser le réseau artériel périphérique, que ce soit aux membres supérieurs ou aux membres inférieurs. L'analyse des artères brachiales est réalisée à l'aide d'antenne spécifique. La technique est la même que celle utilisée pour l'analyse de l'aorte thoracique. Le produit de contraste doit être injecté dans le bras controlatéral afin d'éviter les artéfacts. L'analyse des petites artères de la main nécessite l'utilisation de séquences en haute résolution, d'antenne dédiée et d'une synchronisation de l'acquisition des images au bolus de produit de contraste. L'ARM avec injection de contraste est également utilisée dans le cadre des syndromes du défilé cervicothoracique en réalisant des images avec les bras en position neutre et en abduction (figure 8.7). Dans ce dernier cadre, on se sert également de séquences d'écho de spin haute résolution pour rechercher la cause de la compression artérielle.

Pour l'analyse des membres inférieurs, la technique la plus fréquemment utilisée est la technique de suivi du bolus. Avec cette technique, la première étape est la réalisation d'un masque aux trois étages aorto-iliaque, fémoropoplité et distal. Après injection, le bolus de produit de contraste est suivi sur l'ensemble des membres inférieurs, en se servant d'un déplacement de la table. L'imagerie des vaisseaux distaux peut être gênée par un retour veineux. L'ARM est utilisée dans les maladies sténosantes, en cas d'occlusion comme dans le syndrome de Leriche, et elle est également utilisée pour la surveillance de pontage extra-anatomique.

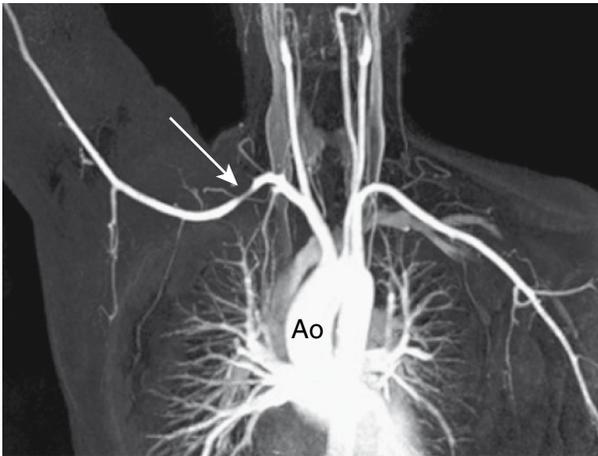


Figure 8.7 Reconstruction MIP d'une ARM avec injection chez une femme de 30 ans présentant un syndrome du défilé cervicothoracique. Les images réalisées avec le bras droit en élévation et en abduction montrent une sténose de l'artère sous-clavière proximale (flèche blanche). Les images réalisées avec le bras en position neutre ne montraient pas d'anomalie.

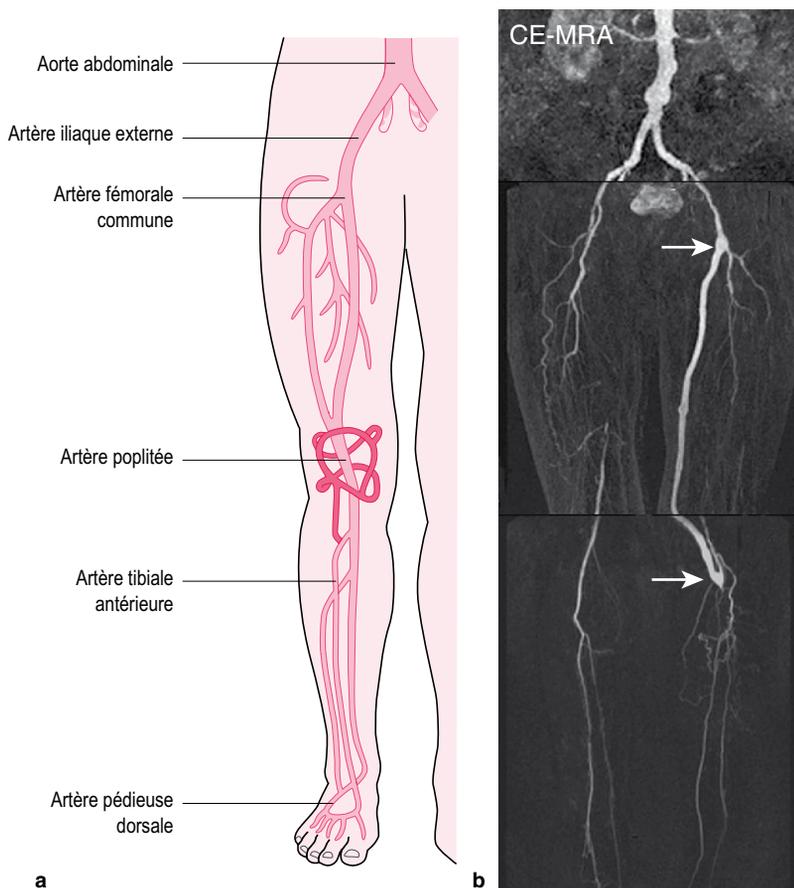


Figure 8.8 Angiographie par résonance magnétique des vaisseaux des membres inférieurs. **a.** Représentation schématique de l'anatomie artérielle des artères des membres inférieurs. **b.** Reconstruction MIP d'une ARM avec injection de contraste chez un homme de 70 ans ayant une claudication intermittente après un pontage fémoropoplité gauche. Le pontage est perméable (flèches blanches).

■ Indications

L'ARM peut :

1. faire le diagnostic des pathologies carotidiennes aussi bien que l'artériographie conventionnelle, de manière absolument non invasive. Elle est largement utilisée dans le bilan préopératoire avant chirurgie cardiaque ou vasculaire ;
2. réaliser une évaluation anatomique des artères pulmonaires et des veines pulmonaires, notamment dans le cas des cardiopathies congénitales, de l'hypertension artérielle pulmonaire et avant ablation par radiofréquence ;

3. analyser les artères mésentériques et les artères rénales ;
4. être utilisée dans le bilan des hypertensions artérielles ;
5. être utilisée dans le bilan des atteintes aortiques congénitales ou acquises ;
6. effectuer le bilan des artériopathies périphériques ;
7. constituer une modalité d'imagerie non invasive pour la surveillance des patients ;

Au contraire, l'ARM ne peut pas :

1. être considérée comme la modalité de première intention chez des patients hémodynamiquement instables ;
2. se substituer à la tomodensitométrie pour le diagnostic d'embolie pulmonaire.

Angiographie par résonance magnétique des artères coronaires

Anitha Varghese

■ Introduction

L'ARM des artères coronaires constitue encore une des limites de la méthode du fait du petit calibre des artères coronaires, de leur caractère tortueux, de leur situation au sein de la graisse épicaudique et des mouvements cardiaques et respiratoires.

À l'heure actuelle, les indications cliniques d'angiographie coronaire sont limitées à la visualisation des segments proximaux du réseau artériel coronaire pour l'analyse des variations anatomiques pour lesquelles l'IRM cardiovasculaire est considérée comme étant de classe I.

■ Techniques d'angiographie par résonance magnétique des artères coronaires

Il existe des techniques en apnée et des techniques en respiration libre. On peut se servir de séquences bidimensionnelles ou de séquences tridimensionnelles en écho de spin ou en écho de gradient. En pratique clinique, la technique la plus fréquemment utilisée est une technique tridimensionnelle en respiration libre ou une technique d'écho de gradient en apnée. Dans les deux cas, l'acquisition est synchronisée à l'électrocardiogramme (ECG) et les séquences sont programmées pour être acquises au cours de la diastole, caractérisée par des mouvements cardiaques limités. Une technique de suppression de la graisse doit être utilisée; l'injection de produit de contraste n'est pas indispensable.

Les techniques tridimensionnelles en respiration libre sont à l'origine d'un rapport signal/bruit de bonne qualité et d'une couverture anatomique suffisante. Les séquences d'écho de gradient sont adaptées à l'imagerie du sang circulant alors que les séquences d'écho de spin sont bien adaptées à l'imagerie de la paroi artérielle.

Les patients respirent normalement pendant l'acquisition et les artéfacts respiratoires sont supprimés par l'utilisation d'un échonavigateur respiratoire. Il s'agit effectivement d'analyser les mouvements respiratoires pendant l'acquisition des données et de synchroniser l'acquisition à ces mouvements. Il existe différentes techniques d'échonavigateur. Ils sont généralement placés au niveau de la partie supérieure de la coupole diaphragmatique droite (figure 9.1). À la suite de la mise en place de l'échonavigateur, les données sont mesurées tant que le déplacement du diaphragme est compris dans un certain intervalle et sont rejetées lorsqu'on est en dehors de cet intervalle. La fenêtre d'acquisition diaphragmatique est positionnée à la fin du cycle expiratoire et recueille les données obtenues dans une fenêtre de 2 à 3 mm au-dessus et en dessous du repère initial.

Les séquences en respiration libre sont acquises en plusieurs minutes et permettent d'obtenir une imagerie caractérisée par une meilleure résolution que les séquences en apnée. L'angiographie par résonance magnétique (ARM) des artères coronaires réalisée par des séquences 3D en écho de gradient en apnée nécessite une apnée d'environ 20 à 25 s, qui dépend de la fréquence cardiaque. Comme on n'utilise pas d'échonavigateur, les séquences sont moins complexes à mettre en place. En revanche, ces séquences en apnée sont caractérisées par une résolution spatiale et une couverture anatomique de moins bonne qualité et sont réservées à l'analyse des segments proximaux des artères coronaires.

En se servant d'ARM utilisant des séquences d'écho de gradient en respiration libre, on peut obtenir une résolution spatiale de l'ordre de $1,1 \times 0,7 \times 1,5$ mm avec une couverture de 30 à 48 mm. En comparaison, on obtient une résolution de $1,3 \times 1,1 \times 1,6$ mm avec une couverture de 16 à 19 mm en apnée. En revanche, les séquences en

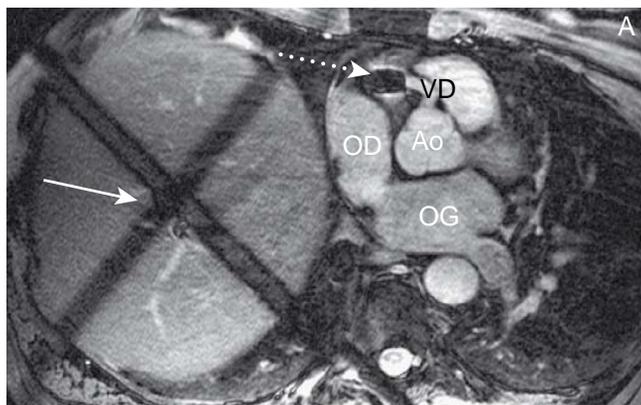


Figure 9.1 Cette ARM coronaire tridimensionnelle en respiration libre, dans un plan transversal oblique, montre la chute de signal provoquée par l'échonavigateur respiratoire au niveau de la coupole diaphragmatique droite (flèche blanche continue) et par le stent coronaire droit (flèche blanche discontinue).

apnée permettent l'acquisition de plusieurs volumes d'analyse dans le même temps qu'une seule acquisition en respiration libre. D'une manière générale, il est utile d'essayer les deux séquences et de choisir la meilleure en fonction du patient étudié (figure 9.2). De plus, l'optimisation de la résolution spatiale permet d'améliorer les performances, mais cela se fait aux dépens du rapport signal/bruit, avec le risque d'obtenir des images bruitées qui sont moins facilement interprétables. La technique de post-traitement courbe constitue la technique de référence pour la représentation anatomique du réseau coronaire.

■ Protocole d'angiographie par résonance magnétique coronaire

Le protocole d'ARM coronaire nécessite une durée d'acquisition de 15 à 20 min pour l'évaluation des troncs coronaires proximaux.

- On se sert d'abord d'images de repérage en écho de spin rapide dans les trois plans de l'espace afin de localiser l'origine des artères coronaires (figure 9.4).
- Les séquences tridimensionnelles volumiques dans un plan transversal oblique sont acquises dans un second temps avec ou sans échonavigateur respiratoire.
- Les séquences complémentaires sont programmées en fonction des premiers résultats.

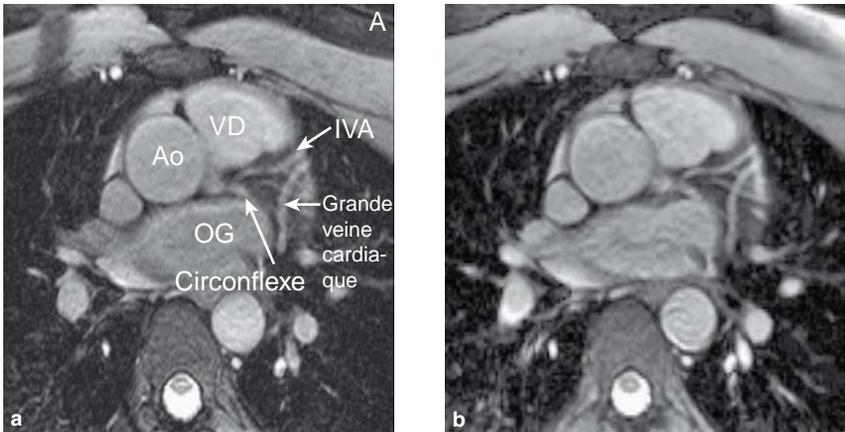


Figure 9.2 Cette image native d'ARM du réseau coronaire gauche chez un homme de 32 ans dans le plan transversal oblique montre une qualité comparable en se servant d'images en respiration libre (a) et en apnée (b).

Avec l'aimable permission de Varghese A, Keegan J, Pennell DJ, Cardiovascular magnetic resonance of anomalous coronary arteries. *Coron Artery Dis* 2005; 16 (6) : 355-64.

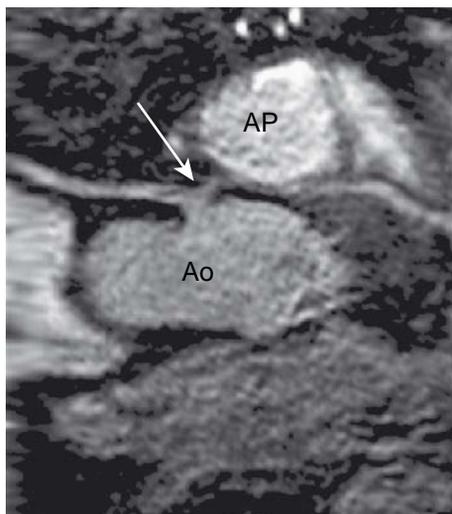


Figure 9.3 La reconstruction multiplanaire courbe montre un tronc artériel commun originaire du sinus de Valsalva droit (flèche blanche). Cette variante anatomique est considérée à haut risque d'ischémie et de mort subite.

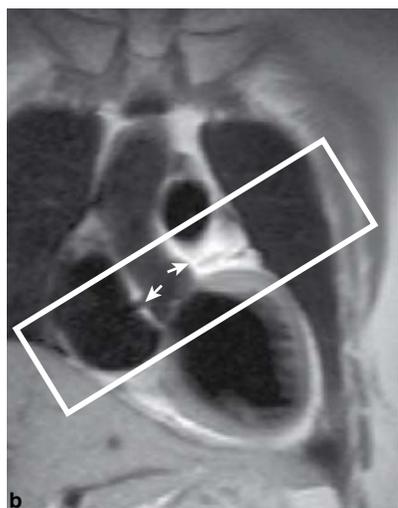
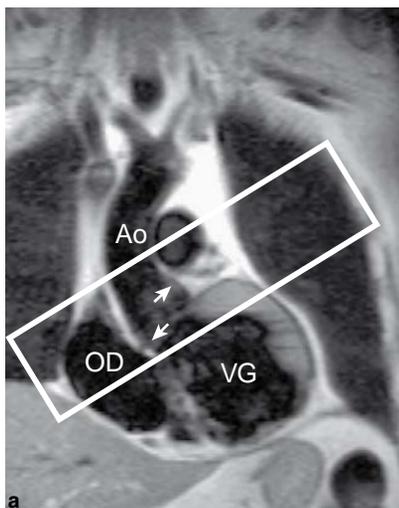


Figure 9.4 Deux exemples de séquences de repérage en écho de spin rapide qui montrent l'origine des artères coronaires (flèches blanches). L'ARM tridimensionnelle est dans un second temps programmée sur le volume d'intérêt dans un plan transversal oblique couvrant les origines des artères coronaires (rectangle blanc).

- Lorsque les images sont de qualité sous-optimale, il faut utiliser une technique alternative :
 - respiration libre ou apnée;
 - vérifier la qualité des techniques de suppression de la graisse;
 - réexpliquer au patient les instructions à suivre. En cas de séquence en respiration libre, il faut que les patients respirent tranquillement et normalement. En apnée, il faut réaliser une apnée inspiratoire plutôt qu'une apnée expiratoire. L'apnée expiratoire est plus reproductible et moins sensible aux variations anatomiques des coupes diaphragmatiques, mais elle est plus difficile à tenir chez certains patients.
- Les conséquences fonctionnelles des atteintes coronaires ont été traitées au sein du chapitre 2.

■ Variantes anatomiques des artères coronaires

Les variantes anatomiques des artères coronaires sont rares et généralement asymptomatiques.

La prévalence de ces variantes anatomiques peut aller de 1 % chez les patients sans autre anomalie cardiaque jusqu'à 36 % pour certaines cardiopathies congénitales telles que les tétralogies de Fallot.

L'importance de ces variantes anatomiques repose sur le risque de survenue d'ischémie myocardique, d'infarctus du myocarde, de syncope et de mort subite, notamment chez de jeunes adultes. Les complications surviennent généralement lors d'un exercice physique intense, lorsqu'il existe un trajet coronaire anormal entre l'aorte et l'artère pulmonaire (figure 9.3). Trois mécanismes physiopathologiques sont proposés pour expliquer ces complications : une compression mécanique anormale de l'artère coronaire entre l'aorte et l'artère pulmonaire, une courbure anormale du segment ostial ou proximal de l'artère coronaire, ou une sténose ostiale congénitale.

Ces variantes anatomiques incluent :

- l'origine de l'artère circonflexe du sinus de Valsalva droit ou de l'artère coronaire droite (figure 9.5). Cette variante est la plus fréquente (plus de 50 % des cas), avec un trajet habituel rétroaortique de l'artère circonflexe;
- l'origine de l'artère coronaire droite du sinus de Valsalva gauche (20 à 25 % des cas), avec un trajet de l'artère coronaire droite entre l'artère pulmonaire et la chambre de chasse du ventricule droit et l'aorte;
- plus rarement, l'origine de la coronaire gauche ou de l'interventriculaire antérieure du sinus de Valsalva droit, avec un trajet interartériel. Il existe d'autres trajets anormaux, rétroaortique en avant de l'artère pulmonaire et intraseptal.

L'ARM coronaire est moins utile pour la visualisation des fistules coronaires et pour les origines anormales des artères coronaires en dehors des sinus de Valsalva, telles que les coronaires issues de l'artère pulmonaire. Les indications d'ARM coronaire sont généralement posées dans les suites d'une angiographie

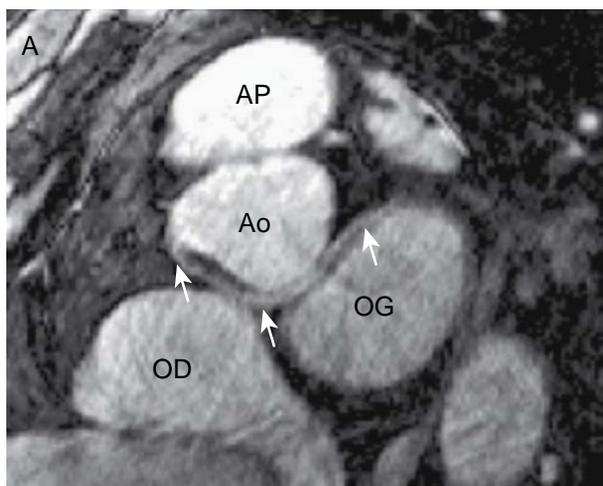


Figure 9.5 Image native d'ARM coronaire dans un plan sagittal oblique chez un homme de 63 ans présentant une hypertension artérielle et des anomalies de l'épreuve d'effort. L'angiographie coronaire conventionnelle a montré une artère coronaire droite non dominante, une artère coronaire gauche perméable et une origine aberrante de l'artère circonflexe prenant naissance du sinus de Valsalva droit. L'ARM était réalisée pour analyser le trajet aberrant de l'artère circonflexe, celle-ci est visualisée dans son trajet le plus habituel en rétroaortique (flèches blanches).

coronaire conventionnelle après échec de cathétérisme d'un des ostiums coronaires, ou lorsqu'une anomalie d'origine a été démontrée angiographiquement et qu'il est nécessaire de préciser le trajet initial de l'artère coronaire. L'ARM coronaire est également utilisée chez les patients porteurs de cardiopathie congénitale et chez les patients jeunes présentant des syncopes ou des douleurs thoraciques inexpliquées. Dans ce dernier cadre, l'ARM coronaire vient compléter le bilan cardiaque complet réalisé par IRM cardiaque. L'ARM a également été proposée chez de jeunes athlètes de compétition à la recherche d'anomalies d'origine des artères coronaires.

Le compte rendu doit inclure :

1. l'existence ou l'absence d'origine anormale et d'anomalies ostiales ;
2. le trajet des artères coronaires ;
3. la longueur de l'artère coronaire correctement visualisée ;
4. les résultats de l'IRM de perfusion si elle a été réalisée.

■ Anévrismes des artères coronaires et maladie de Kawasaki

Les anévrismes des artères coronaires sont rares. Les causes d'anévrismes coronaires sont congénitales ou acquises dans le cadre de maladie athéromateuse, de chirurgie

coronaire, d'affection du tissu conjonctif ou de maladie inflammatoire telle que la maladie de Kawasaki (figure 9.6). La maladie de Kawasaki est une vascularite qui intéresse les enfants. Les complications cardiovasculaires constituent les causes les plus fréquentes de morbidité par le biais de myocardite et de régurgitation valvulaire. Les anévrismes des artères coronaires peuvent se compliquer d'infarctus du myocarde, de mort subite. Les localisations anévrismales les plus fréquentes sont dans un ordre décroissant :

- le segment proximal de l'artère coronaire gauche et de l'artère coronaire droite;
- le tronc de l'artère coronaire gauche;
- l'artère circonflexe gauche;
- l'artère coronaire droite distale;
- la jonction artère coronaire droite et artère coronaire descendante postérieure.

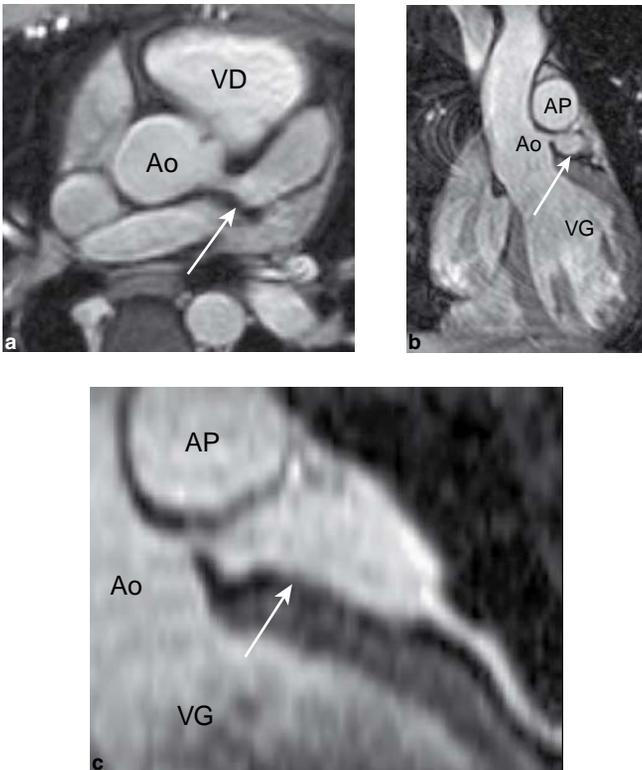


Figure 9.6 L'ARM coronaire tridimensionnelle en respiration libre chez un garçon de 14 ans montre un anévrisme géant de l'artère coronaire gauche (flèches blanches) dans les suites d'une maladie de Kawasaki. **a,b.** Images natives dans les plans transversal et coronal oblique. L'anévrisme intéresse le tronc de l'artère coronaire gauche, 5 mm après l'ostium, avec une extension qui intéresse l'artère coronaire gauche proximale. Cet anévrisme mesure 33 × 16 mm. **c.** La reconstruction multiplanaire oblique réalisée 8 mois plus tard montre qu'il n'existe pas d'évolution par rapport à l'examen initial.

Ainsi, la majorité de ces localisations sont accessibles à l'ARM coronaire, qui est généralement utilisée en seconde intention après l'échographie transthoracique chez les enfants. La surveillance habituelle de patients porteurs d'anévrisme unique de petite taille (entre 3 et 6mm) se fait par la réalisation d'un électrocardiogramme (ECG), d'une échographie transthoracique tous les ans, d'une épreuve de stress et d'une imagerie myocardique de perfusion tous les 2ans, à partir de l'âge de 10ans. Les patients porteurs d'un anévrisme coronaire volumineux, supérieur ou égal à 6mm, ou de plusieurs anévrismes sans signe d'occlusion coronaire, et ceux qui ont une sténose coronaire doivent avoir un ECG et une échographie transthoracique 2 fois par an ainsi qu'une épreuve de stress avec analyse de la perfusion myocardique tous les ans. Une angiographie périphérique et abdominale doit également être réalisée du fait des possibilités de localisation anévrismale à distance du réseau coronaire. Les localisations les plus fréquentes sont au niveau sous-clavier, fémoral et iliaque et moins fréquemment au niveau de l'aorte abdominale et des artères rénales. C'est la raison pour laquelle l'IRM cardiovasculaire constitue une imagerie de référence pour l'évaluation de ces malades.

Le compte rendu doit inclure :

1. la description précise des anévrismes coronaires et la longueur de segment coronaire correctement visualisé ;
2. l'association à une régurgitation mitrale ou à une régurgitation aortique sur les coupes en ciné-IRM ;
3. l'absence de signe en faveur de myocardite ou d'infarctus du myocarde en se servant de séquences de ciné-IRM et de séquences après injection ;
4. les résultats de l'IRM de perfusion.

■ Indications

L'ARM coronaire peut :

1. réaliser le bilan des variantes anatomiques des artères coronaires ;
2. être utilisée pour la surveillance des anévrismes intéressant les segments proximaux des anévrismes des artères coronaires.

L'ARM coronaire ne peut pas :

1. rivaliser avec la qualité des angiographies coronaires conventionnelles pour l'analyse des sténoses coronaires ;
2. rivaliser avec la résolution spatiale obtenue en tomographie par ordinateur ou réaliser un score calcique de qualité.

Artéfacts en IRM cardiovasculaire

Chad A. Hoyt

■ Introduction

L'IRM cardiovasculaire permet d'obtenir des images d'excellente qualité, mais il est utile de savoir reconnaître les artéfacts qui peuvent être à l'origine de difficultés d'interprétation.

■ Artéfacts de mouvement

Les artéfacts en rapport avec les mouvements du patient sont fréquents. On parle fréquemment d'« images fantômes » (figure 10.1).

Les mouvements les plus fréquemment impliqués sont les mouvements respiratoires et les battements cardiaques. Les autres causes sont en rapport avec les flux circulatoires et les mouvements du patient au sein de l'aimant.

La déformation de l'image est provoquée par un déplacement anatomique entre l'application du codage de phase et du codage de fréquence, à l'origine d'artéfacts dans le sens du codage de phase. C'est la raison pour laquelle les artéfacts de mouvement sont visualisés dans la direction du codage de phase, sous la forme d'images fantômes. Les artéfacts se manifestent sous la forme d'images de répétition, présentant un motif périodique. L'image artéfactuelle présente un signal élevé aux dépens de l'organisme d'origine dont le signal est diminué. Il existe plusieurs techniques pour réduire ces artéfacts de mouvement. Il est possible d'inverser les directions des codages de phase et de fréquence afin de projeter les artéfacts en dehors de la zone d'intérêt. Il existe également, en fonction des firmes, des artéfacts de correction des mouvements par l'adjonction de gradients supplémentaires et des techniques plus spécifiques destinées à minimiser les artéfacts respiratoires ou cardiaques.

Mouvements respiratoires

Les artéfacts relatifs aux mouvements respiratoires sont généralement éliminés par l'acquisition de séquences en apnée en expiration forcée (figure 10.2). Lorsque les artéfacts respiratoires sont encore observés, il faut réexpliquer les consignes au

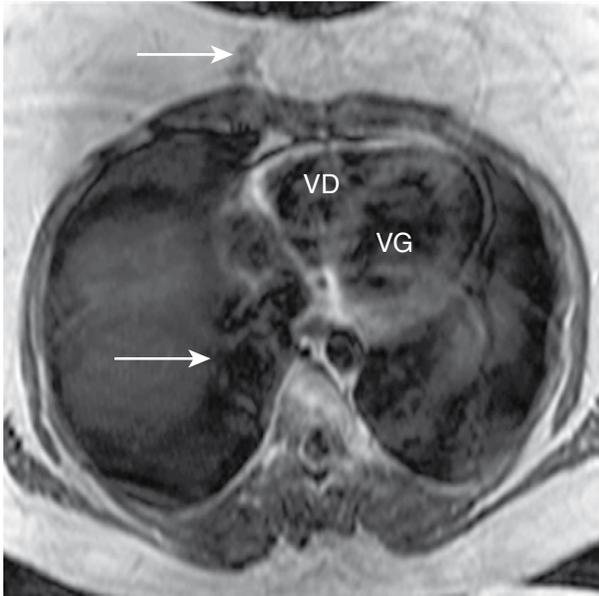


Figure 10.1 On visualise sur les images en écho de spin les artéfacts de répétition de la silhouette cardiaque dans la direction du codage de phase du fait des battements du cœur (flèches).

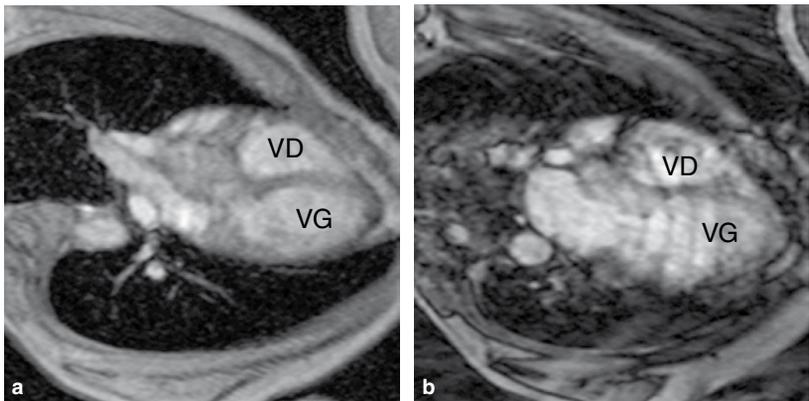


Figure 10.2 Image en écho de gradient avec (a) et sans (b) apnée qui montre les artéfacts provoqués par le déplacement de la paroi thoracique antérieure.

patient et recommencer l'acquisition (figure 10.3). Si les artéfacts sont encore présents, on peut réaliser l'apnée en inspiration forcée ou réduire la durée d'acquisition en se servant de techniques telles que les techniques d'acquisition parallèles. Ces techniques d'acquisition parallèles peuvent être utilisées soit pour réduire le temps d'acquisition, soit pour améliorer la résolution de l'examen.

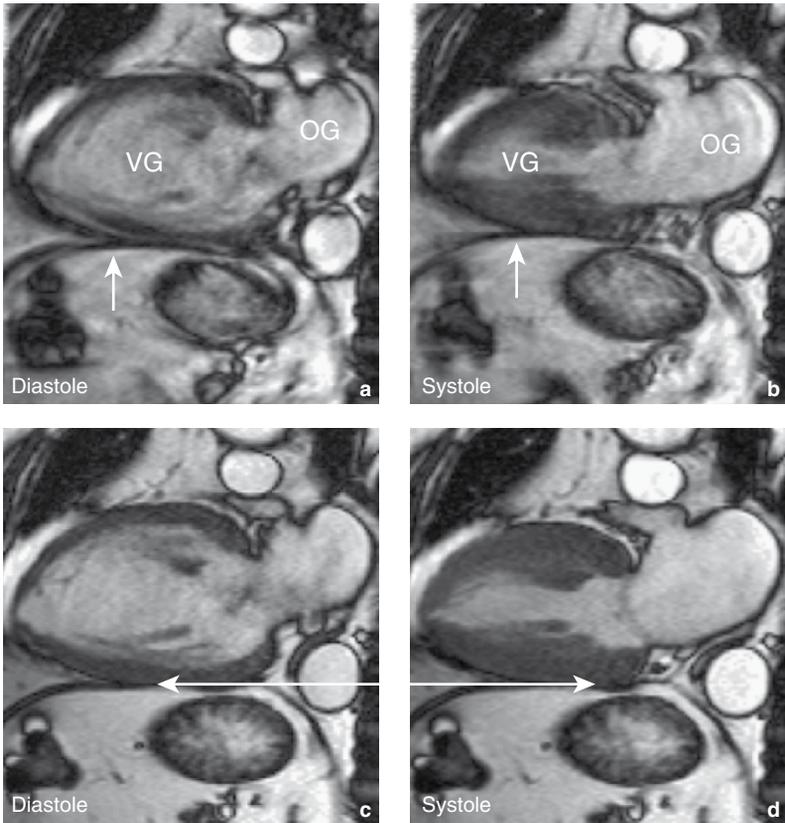


Figure 10.3 Image ciné-IRM deux cavités d'un homme de 71 ans présentant une dyspnée secondaire à une insuffisance aortique traduite par une dilatation de la racine de l'aorte et de l'aorte thoracique initiale. **a,b.** Il existe des artéfacts en rapport avec le déplacement de la coupole diaphragmatique (flèches blanches) qui gênent l'analyse du cœur. **c,d.** Les séquences successives après avoir réexpliqué les consignes au patient montrent que les mouvements du diaphragme ne sont plus visualisés.

Lorsque l'on choisit de réduire la durée d'acquisition, il existe une certaine diminution de la qualité des images. Les techniques d'échonavigateur respiratoire peuvent également être utilisées comme dans le cadre de l'angiographie par résonance magnétique (ARM) coronaire. On peut encore utiliser une bande de présaturation appliquée sur la paroi thoracique, afin d'éliminer son signal. Les bandes de présaturation peuvent être localisées à une région anatomique ou à une structure chimique, telles les bandes de saturation destinées à supprimer spécifiquement le signal du tissu graisseux. On parle alors de « technique de suppression de la graisse ».

Mouvements cardiaques

Les artéfacts en rapport avec les battements cardiaques sont généralement supprimés par la synchronisation à l'électrocardiogramme (ECG). L'acquisition est synchronisée à l'onde R. La détection correcte des ondes R constitue la première partie de l'examen d'IRM cardiovasculaire. Lorsqu'il est difficile de mesurer correctement une onde R, on peut repositionner les électrodes d'ECG. Il est moins facile de gérer les rythmes cardiaques irréguliers à l'origine d'intervalles R-R variables. Ceci peut être observé en cas de fibrillation auriculaire, d'extrasystole ventriculaire fréquente ou d'extrasystoles ventriculaires bigéminées (figure 10.4). En cas de fibrillation auriculaire, on peut mettre en place une variante de la synchronisation à l'ECG type synchronisation prospective. Cette technique est opposée aux techniques de synchronisation rétrospective qui permettent l'acquisition des données sur l'ensemble du cycle cardiaque. Les techniques de synchronisation rétrospective sont bien adaptées aux patients présentant un intervalle R-R régulier. Lorsque l'intervalle R-R est irrégulier, il est préférable de mettre en place une synchronisation prospective. En revanche, cette synchronisation prospective ne permet l'acquisition des données que sur une portion plus réduite du cycle cardiaque. En cas d'extrasystoles ventriculaires fréquentes, on peut mettre en place un logiciel spécifique d'élimination des extrasystoles. En revanche, en présence d'extrasystoles ventriculaires bigéminées, il devient difficile de différencier les extrasystoles des cycles normaux. On peut alors essayer de ne garder que les ondes R normales, mais dans ce cas la durée d'examen est augmentée, ou on peut utiliser des agents antiarythmiques tels que les bêtabloquants. Des techniques d'acquisition parallèles peuvent également être utilisées pour diminuer les artéfacts de mouvement en rapport avec les battements cardiaques.

Résumé

Causes : mouvements respiratoires, battements cardiaques, mouvements du patient.

Traduction : images fantômes.

Techniques :

- respiratoire : apnée, algorithme de compensation respiratoire ;
- cardiaque : repositionnement des électrodes de l'ECG, modification des techniques de recueil de l'ECG, synchronisation prospective plutôt que rétrospective, logiciel d'élimination des extrasystoles, traitement antiarythmique ;
- autres : inversion des directions de codage de phase et de fréquence, technique d'acquisition parallèle pour diminuer le temps d'acquisition.

■ Artéfacts métalliques

Des exemples d'artéfact métallique, connus également sous le terme d'« artéfacts de susceptibilité magnétique », ont été montrés tout au long de ce livre. Il existe effectivement une modification de l'homogénéité du champ magnétique lorsqu'on place tout composant au sein d'un aimant. Les capacités d'un matériel donné à modifier un champ magnétique sont connues sous le terme de « susceptibilité ». La susceptibilité de l'eau est nulle par définition, alors qu'air et os présentent des susceptibilités

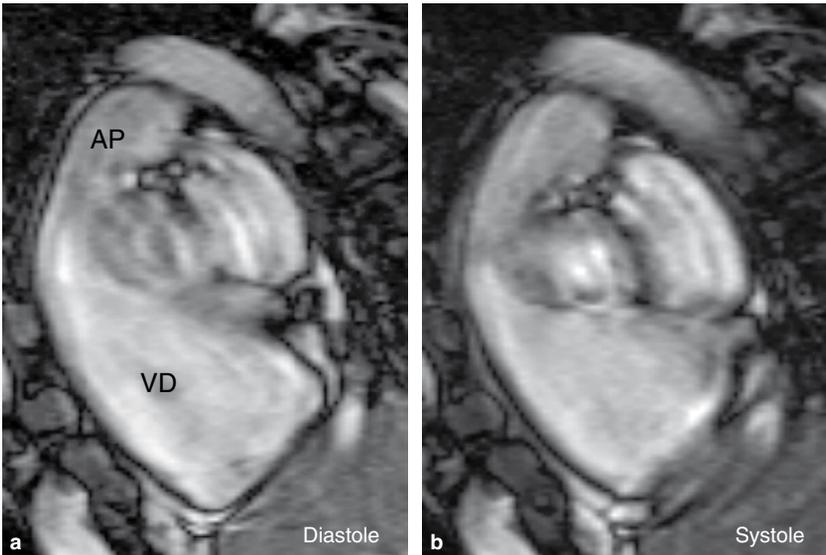


Figure 10.4 Séquence ciné-IRM dans l'incidence chambre de chasse du ventricule droit chez un homme de 33 ans présentant une dysplasie arythmogène du ventricule droit obtenue lors d'un épisode d'extrasystoles ventriculaires bigémínées.

magnétiques négatives puisqu'elles sont à l'origine de champ magnétique inférieur à celui de l'eau. Au contraire, les matériaux ferromagnétiques tels que le fer ou les matériaux tels que le titane ou le nitinol augmentent le champ magnétique et sont donc caractérisés par une susceptibilité magnétique positive. Les champs magnétiques deviennent hétérogènes aux interfaces entre les substances présentant des susceptibilités magnétiques différentes, c'est la raison pour laquelle les objets métalliques portés par le patient provoquent des artéfacts de susceptibilité magnétique à l'origine de déphasage traduit par l'existence d'artéfacts.

Les artéfacts métalliques sur les séquences d'écho de gradient se présentent sous la forme d'altération du signal avec des zones vides de signal et des zones de signal élevé qui se traduisent par une distorsion des images (figures 10.5 et 10.6). Les séquences d'écho de spin sont moins touchées par ces artéfacts métalliques du fait de l'addition d'impulsions de rephasage (figure 6.11). C'est la raison pour laquelle il faut être vigilant à la présence d'objets métalliques portés par les patients, qui doivent être retirés tant que faire se peut.

Résumé

Cause : différence de susceptibilité magnétique.

Traduction : zone vide de signal, zone de signal élevé et distorsion de l'image.

Intervention : enlever les pièces métalliques si possible, utilisation de séquences d'écho de spin.

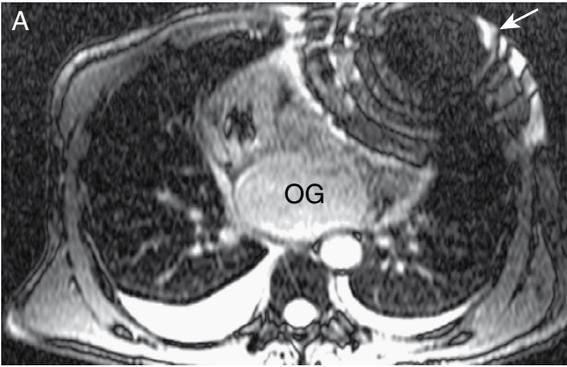


Figure 10.5 Artéfact métallique caractéristique (flèche) sur une séquence d'écho de gradient chez un malade de 58 ans porteur d'un stimulateur cardiaque. Les stimulateurs cardiaques restent une contre-indication de l'IRM cardiovasculaire dans la plupart des centres.

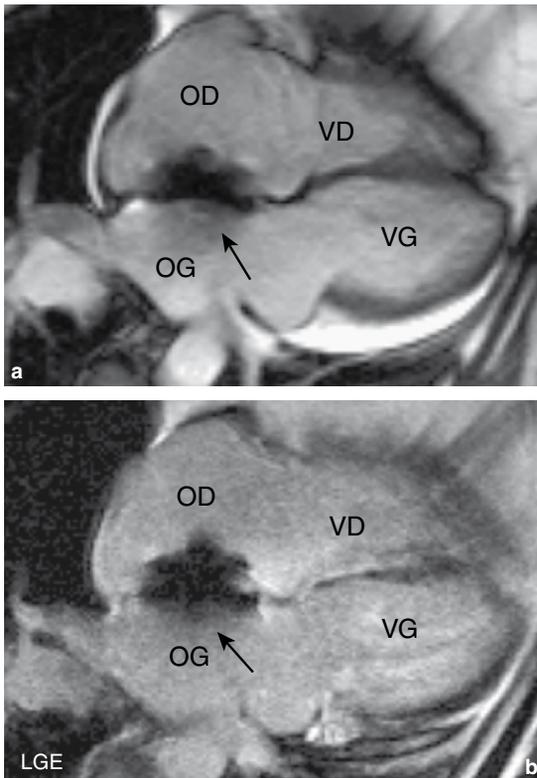


Figure 10.6 Les séquences de ciné-IRM (a), et les séquences tardives après injection montrent des artéfacts métalliques en rapport avec une prothèse métallique de fermeture de CIA type Amplatzer (flèche).

■ Artéfact de repliement

Il s'agit d'un artéfact fréquemment observé lorsque le champ de vue sélectionné est plus petit que la structure anatomique étudiée. Dans ces conditions, les structures anatomiques situées à l'extérieur du champ de vue sont repliées au sein du champ de vue. À l'heure actuelle, les artéfacts de repliement ne posent problème que dans la direction de codage phase. Ils sont visualisés sous la forme d'un repliement d'une structure de l'autre côté de sa situation anatomique (figure 10.7). On peut éviter les

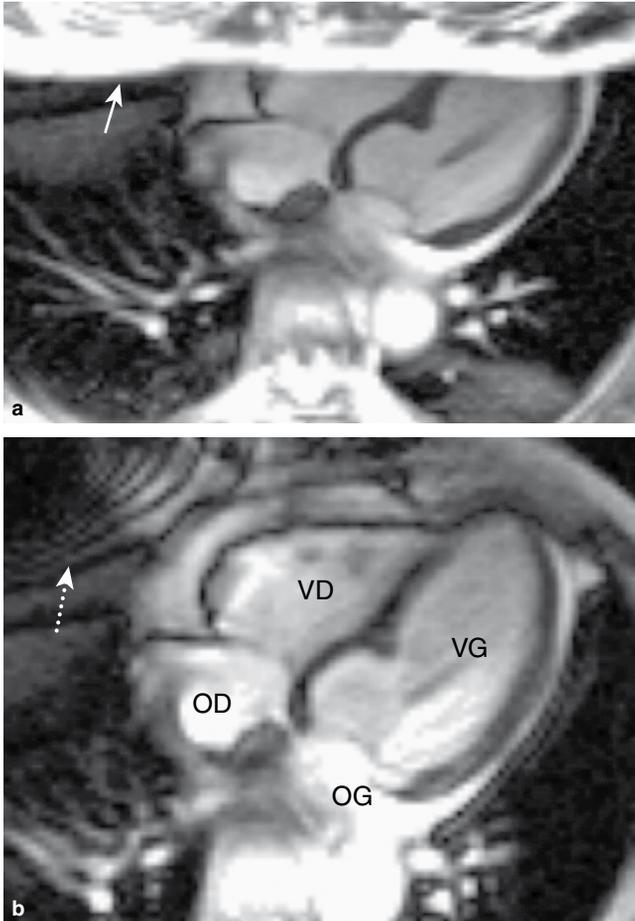


Figure 10.7 L'image ciné-IRM quatre cavités montre des artéfacts de repliement chez un malade de 62 ans. **a.** La paroi thoracique postérieure se projette sur la paroi thoracique antérieure (flèche blanche continue). **b.** Le suréchantillonnage dans la direction du codage de phase permet d'éliminer l'artéfact de repliement aux dépens d'une augmentation de la durée d'acquisition et de la visualisation des artéfacts métalliques situés au niveau de la paroi thoracique antérieure (flèche blanche discontinue).

artéfacts de repliement en augmentant le champ de vue et en diminuant le signal des structures situées en dehors du champ de vue en se servant d'impulsions de présaturation sélective. Quand on augmente le champ de vue en modifiant les directions du codage de phase et de fréquence, on peut observer une dégradation de la qualité des images ou d'une augmentation de la durée d'acquisition. Le suréchantillonnage dans la direction du codage de phase augmente également la durée d'acquisition. On peut tolérer un certain degré de repliement s'il est observé dans des régions qui ne sont pas spécifiquement étudiées lors de l'examen.

Résumé

Causes : échantillonnage insuffisant des données brutes.

Traduction : repliement de l'image.

Technique : augmenter le champ de vue, suréchantillonnage dans la direction du codage de phase.

Inconvénients : diminution de la résolution, augmentation de la durée de l'examen (peut être à l'origine d'artéfacts de mouvements).

■ Artéfact de Shim

Les artéfacts de Shim sont la conséquence d'hétérogénéité du champ magnétique. On peut réaliser ce qu'il est convenu d'appeler un « *shimming* » pour améliorer l'homogénéité du champ magnétique. Cet artéfact de Shim se traduit par l'alternance de zones à signal bas et à signal élevé (figure 10.8). La majorité des techniques de *shimming*

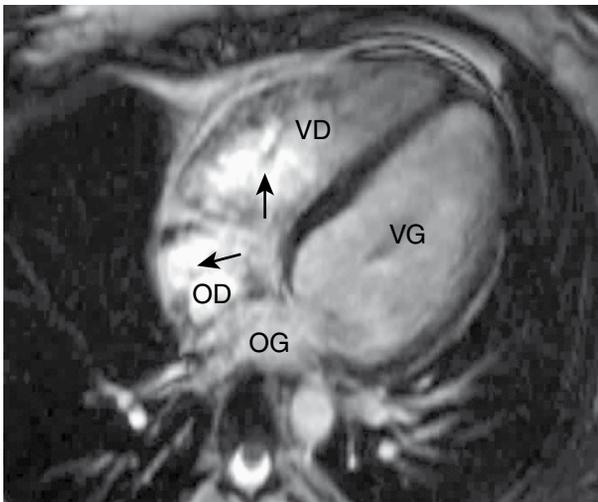


Figure 10.8 Artéfact de Shim visualisé sous la forme de zones intenses et de zones vides de signal au sein de l'oreillette droite et du ventricule droit (flèche noire) chez un patient porteur d'une surcharge en fer dans les suites d'une thalassémie.

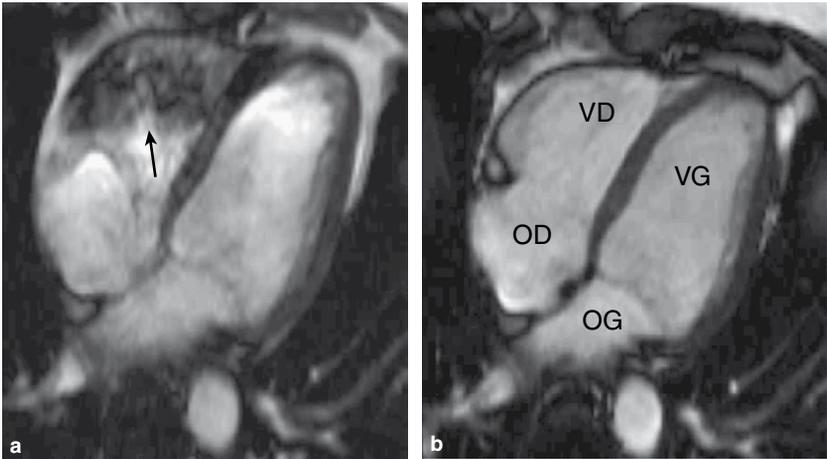


Figure 10.9 Amélioration de l'image entre une acquisition avant **(a)** et après un shimming manuel **(b)** sur la visualisation du flux sanguin au sein du ventricule droit (flèche noire) visible en ciné-IRM quatre cavités.

sont maintenant automatiques, même si on peut encore réaliser un *shimming* manuel en quelques minutes (figure 10.9).

Résumé

Causes : hétérogénéité du champ magnétique.

Traduction : signal élevé ou signal bas.

Technique : shimming automatique, shimming manuel en servant de bobines de gradient spécifique.

■ Variantes anatomiques

Il existe des variantes anatomiques qui peuvent être prises pour des anomalies en IRM cardiovasculaire. Deux d'entre elles sont constituées par la crête terminale située au niveau de l'oreillette droite et par le récessus péricardique supérieur. La crête terminale peut être prise pour une masse auriculaire droite, le récessus péricardique supérieur peut être pris pour une dissection aortique (figure 10.10).

■ Artéfact de déplacement chimique

Les protons situés au sein de la graisse ont un environnement chimique différent des protons situés au sein de l'eau. Les différences d'environnement sont à l'origine de différences de fréquence de précession des protons et donc d'artéfacts de déplacement chimique. L'application d'impulsions de présaturation sélective du signal de la graisse peut diminuer ou annuler ces artéfacts de déplacement chimique.

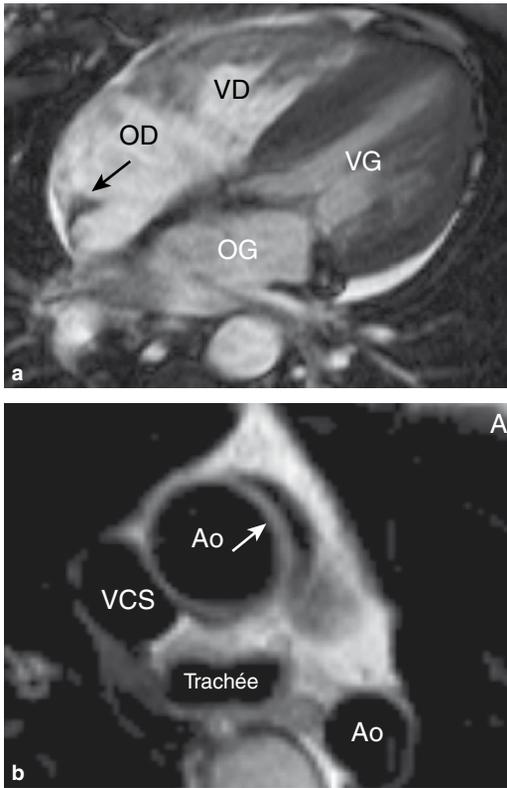


Figure 10.10 La séquence de ciné-IRM en quatre cavités **(a)** montre une crête terminale (*crista terminalis*) proéminente au sein de l'oreillette droite (flèche noire). La séquence en écho de spin rapide dans le plan transversal **(b)** montre un récessus péricardique supérieur au contact de l'aorte thoracique ascendante (flèche blanche).

Artéfact de déplacement chimique de premier ordre

Cet artéfact est d'autant plus marqué que le champ magnétique est élevé. L'augmentation de la résolution dans le sens du codage de fréquence permet de diminuer ces artéfacts de déplacement chimique.

Artéfact de déplacement chimique de second ordre

Lorsque les protons de l'eau et les protons de la graisse sont en opposition de phase, il existe une annulation du signal. Cet artéfact de déplacement chimique de second ordre est à l'origine d'un artéfact de bord visualisé sous la forme d'un liséré noir à l'interface des tissus hydriques et graisseux. L'utilisation de séquences d'écho de spin qui emploient des impulsions de rephasage diminue ces artéfacts. En écho de gradient, le temps d'écho peut être modifié afin de recueillir le signal en phase plutôt

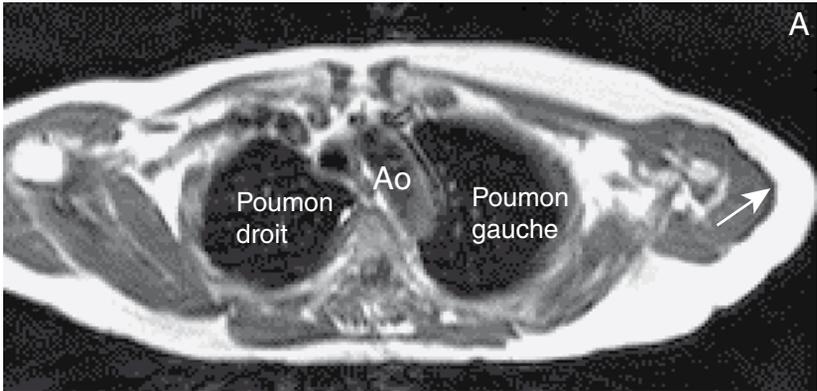


Figure 10.11 Image en écho de spin montrant un artéfact de déplacement chimique dans la direction du codage de fréquence sous la forme d'un liséré vide de signal à la limite entre la graisse sous-cutanée et les tissus musculaires hydriques du muscle deltoïde gauche (flèche blanche).

qu'en opposition de phase, mais ce peut être à l'origine d'une diminution du nombre de coupes obtenues.

■ Artéfact externe

Dispositif

Les artéfacts provoqués par des dispositifs externes sont généralement évidents à reconnaître, puisqu'ils sont situés en regard de leur position sur le patient, comme les artéfacts provoqués par les électrodes d'ECG (figure 10.12).

Radiofréquence externe

Un artéfact en forme de ligne observé le long d'une ligne de codage de phase peut être la conséquence d'une réception d'un signal de radiofréquence externe tel que ceux qui sont émis par la radio ou la télévision (figure 10.13).

■ Artéfact de volume partiel

Les artéfacts de volume partiel sont dus au caractère fini de la résolution spatiale. La résolution spatiale est déterminée par la taille du voxel. Au sein d'un voxel, différents signaux ne peuvent être différenciés et une intensité de signal moyenne est obtenue. La diminution des artéfacts de volume partiel est effectuée en augmentant la résolution spatiale par l'utilisation de voxels plus petits, mais ceci se fait aux dépens du rapport signal/bruit. Ces artéfacts de volume partiel peuvent être à l'origine d'une non-visualisation de structures très fines ou trop petites (figure 10.14). C'est la raison pour laquelle certaines sténoses coronaires peuvent ne pas être reconnues. Il peut être difficile de visualiser des structures fines, telles que les valves cardiaques, dans certains plans de l'espace.

Résumé

Causes : structures intéressées par un seul plan de coupe.

Résultat : l'image reconstruite constitue la sommation des différentes structures du voxel.

Action : utiliser des coupes plus fines à l'origine de plus petits voxels.

Conséquence délétère : dégradation du rapport signal/bruit.

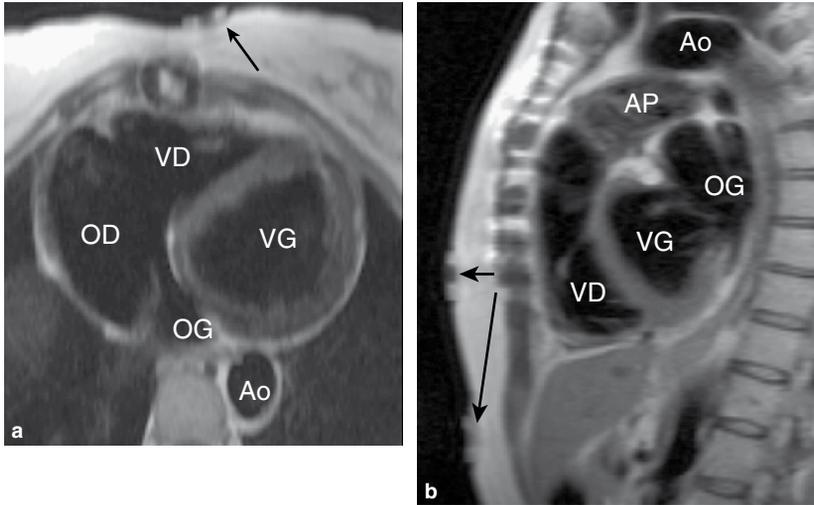


Figure 10.12 Images transversale et sagittale en écho de spin, montrant des artéfacts externes en rapport avec une électrode d'ECG mise en place pour la synchronisation cardiaque (flèches noires).

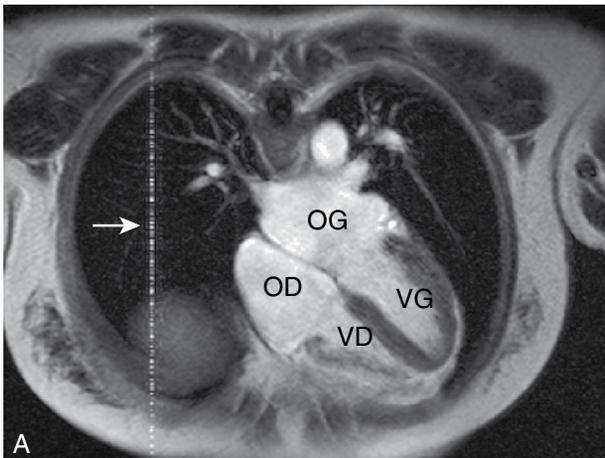


Figure 10.13 Séquence après injection de gadolinium dans le plan quatre cavités, montrant un artéfact de radiofréquence externe dû au recueil d'un signal de radiofréquence extérieure alors que la porte de la salle d'examen n'était pas complètement fermée.

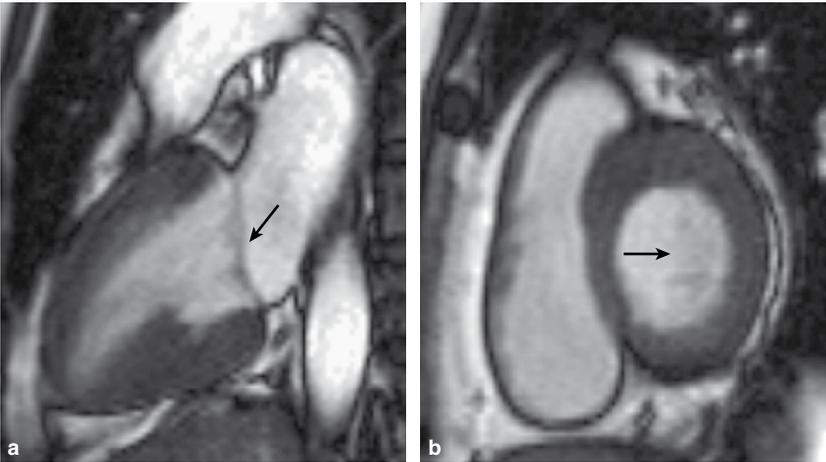


Figure 10.14 Les images ciné-IRM dans le plan deux cavités et dans le plan petit axe basal montrent l'effet des artéfacts de volume partiel sur la visualisation de la valve mitrale (flèche noire). L'épaisseur de coupe est de 7 mm. Dans le plan petit axe, la valve mitrale n'est plus visualisée.

■ Autres

Excitation croisée

Les artéfacts d'excitation croisée sont la conséquence d'interférences de signal entre deux coupes adjacentes. Effectivement, le profil de sélection de coupes n'est pas parfaitement rectangulaire et il existe un certain degré de superposition des coupes lorsqu'elles sont contiguës. C'est la raison pour laquelle les impulsions de radiofréquence peuvent stimuler des protons d'une coupe adjacente. Les artéfacts d'excitation croisée sont généralement observés lors d'acquisition multicoupe et sont visualisés sous la forme de zones vides de signal qui se projettent sur l'image. L'utilisation d'un intervalle entre des coupes adjacentes ou la réalisation de coupes non contiguës dans un mode interlacé permet de réduire cet artéfact.

Résumé

Causes : excitation par l'onde de radiofréquence de la coupe adjacente.

Conséquence : bande de perte de signal.

Technique : programmation d'un espacement d'au moins 10 % entre les coupes ou mode d'acquisition interlacé.

Artéfacts de troncature

Les artéfacts de troncature sont également connus sous le terme d'« artéfacts de Gibbs ». Les images d'IRM cardiovasculaire sont la traduction d'une transformation du signal à l'aide d'un outil mathématique, la transformée de Fourier. Les artéfacts de troncature sont la conséquence des limites de la transformée de Fourier lorsque

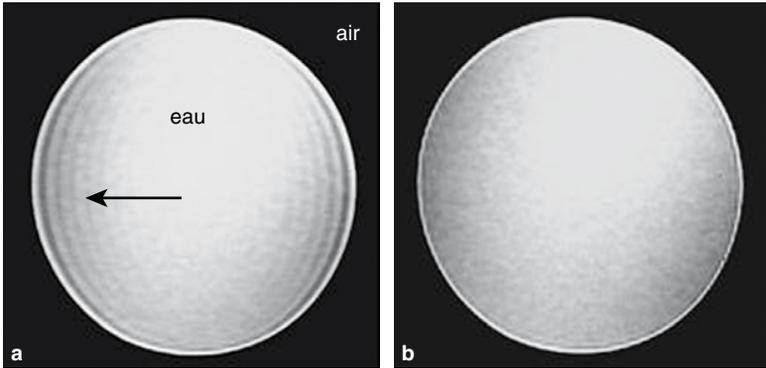


Figure 10.15 Sur un « fantôme », l'expérience montre une réduction des artéfacts de troncature (flèche noire) en augmentant la résolution spatiale, en doublant le nombre de lignes de codage de phase de 128 à 256.

la transition d'un signal à l'autre est très abrupte et non progressive. Les artéfacts de troncature sont visualisés dans la direction de codage de phase ou dans la direction de codage de fréquence et se traduisent sous la forme de lignes parallèles, de répétition à la ligne d'interface entre une structure de très haut signal et une structure de très bas signal (figure 10.15). Un élargissement artificiel de l'interface entre les zones d'un contraste élevé peut être visualisé, un renforcement artificiel de cette interface peut également être observé. On peut réduire les artéfacts de troncature en augmentant la résolution spatiale ou en diminuant le contraste entre les deux structures. On peut donc utiliser un suréchantillonnage en direction du codage de phase pour améliorer la résolution spatiale. On peut se servir de techniques de suppression de la graisse pour diminuer les artéfacts de troncature au contact de tissu adipeux.

Résumé

Causes : modification brutale de l'intensité du signal.
Visualisation : lignes parallèles à l'interface signal élevé/signal bas.
Technique : augmenter la résolution spatiale, réduire le contraste à l'interface.
Limite : augmentation du temps d'examen et de la durée d'apnée.

Artéfact de ligne de fréquence centrale

Cet artéfact est visualisé sous la forme d'un point central intense au centre de l'image. Cet artéfact peut être simplement supprimé par l'adjonction d'un logiciel supplémentaire.

Résumé

Causes : défaut logiciel.
Visualisation : point central hyperintense.
Technique : prévenir le service de maintenance.

Conclusion

L'IRM cardiovasculaire peut :

1. être à l'origine d'une évaluation cardiovasculaire anatomique et fonctionnelle en se servant d'une technique strictement non invasive, n'utilisant pas de radiations ionisantes et se servant de produits de contraste peu néphrotoxiques ;
2. être utilisée chez les patients porteurs de valves prothétiques, de fils sternaux, de prothèses articulaires, de stents coronaires.

L'IRM cardiovasculaire ne peut pas :
remplacer l'échocardiographie.

Pour aller plus loin

Ouvrages courts

Physique

Schild HH. *MRI made easy (... well almost)*. Allemagne : Heenemann; 1990. Sponsorisé par Schering AG.

Clinique

Pennell DJ, Sechtem UP, Higgins CB, Manning WJ, Pohost GM, Rademakers FE, et al. Clinical indications for cardiovascular magnetic resonance (CMR) : Consensus Panel report. *Eur Heart J* 2004; 25 : 1940–65.

Physique et clinique

Mohiaddin RH. *Introduction to cardiovascular magnetic resonance*. Royaume-Uni : Current Medical Literature; 2002. Sponsorisé par Servier.

Ce livre est à recommander aux cliniciens.

Ouvrages de référence

Physique

Mitchell DG. *MRI principles*. États-Unis : WB Saunders; 1999.

Physique et clinique

Manning WJ, Pennell DJ, éd. *Cardiovascular magnetic resonance*. États-Unis : Churchill Livingstone; 2002.

Index

A

- absence congénitale du péricarde, 78
- affections aortiques, 81
- aliasing, 4
- angiographie par résonance magnétique, 6, 111
 - avec injection de produit de contraste, 111
- angiographie par résonance magnétique des artères coronaires, 125
- anomalies aortiques congénitales rares, 93
- anévrisme de l'aorte thoracique, 83
- anévrismes des artères coronaires, 130
- aorte, 119
- aortite, 90
- artéfact de déplacement chimique, 141
- artéfact de ligne de fréquence centrale, 146
- artéfact de repliement, 139
- artéfact de Shim, 140
- artéfact de volume partiel, 143
- artéfact externe, 143
- artéfacts de mouvement, 133
- artéfacts de troncature, 145
- artéfacts en IRM cardiovasculaire, 133
- artéfacts métalliques, 136
- artères carotides, 113
- artères collatérales systémiques, 100
- artères périphériques, 121
- artères pulmonaires, 115
- artères rénales et mésentériques, 117
- atteintes péricardiques, 70
- atteintes polyvalvulaires, 61

B

- bases physiques, 1

C

- canal artériel, 100
- caractérisation tissulaire myocardique, 38
- cardiomyopathie dilatée, 35, 44
- cardiomyopathie hypertrophique, 35, 40
- cardiomyopathies, 35, 40
- cardiomyopathies restrictives, 35, 48
- cardiopathie ischémique, 21, 25
- cardiopathies congénitales chez l'adulte, 95, 98

- cartographie des vitesses, 3
- ciné-IRM, 3
- coarctation aortique, 91
- communication interauriculaire, 100
- communication interventriculaire, 98
- contre-indications, 19

D

- dissection aortique, 86
- dysfonction myocardique, 35
- dysplasie arythmogène du ventricule droit, 35, 47

E

- épanchement péricardique, 74
- épreuve de stress, 32
- excitation croisée, 145

F

- fonction cardiaque, 37

H

- hématome mural, 87

I

- indications, 14
- indications de l'IRM cardiovasculaire, 16, 17, 18
- infarctus du myocarde, 21
- insuffisance aortique, 54
- insuffisance cardiaque, 35
- insuffisance mitrale, 60
- insuffisances pulmonaires, 62
- insuffisances tricuspides, 62
- IRM de perfusion, 32

K

- kyste et diverticule péricardique, 78

L

- logiciel, 7

M

- maladie d'Anderson-Fabry, 42
- maladie d'Ebstein, 103
- maladie de Kawasaki, 130
- masses cardiaques, 65
- maximum intensity projection, 113

morphologie cardiaque, 37
mouvements cardiaques, 136
mouvements respiratoires, 133
myocardite, 78
myxome, 69

N

nécrose myocardique, 21
non-compaction myocardique, 48

O

obstruction de la chambre de chasse
du ventricule droit, 100
obstruction microvasculaire, 22
opération de Fontan, 108

P

perfusion myocardique, 29
péricardite aiguë, 74
péricardite constrictive, 74
persistance du canal artériel, 103
phénocopies, 36, 41
plans de coupe, 7
précautions, 19
protocole d'acquisition standard, 14
protocoles, 7

R

reconstruction multiplanaire
courbe, 113
repliement, 4
retour veineux pulmonaire
anormal, 100
rétrécissement aortique, 51
rétrécissement mitral, 58

S

sarcoïdose, 48
shunt aortopulmonaire, 103
séquences dites de viabilité, 23
séquences principales, 3
séquences « sang blanc », 3
séquences « sang noir », 3
séquences temps de vol, 112
sténose pulmonaire, 62, 100
stress, 30
syndrome de Marfan, 91
système d'imagerie, 7

T

technique de rendu volumique
et de reconstruction surfacique, 113
tétralogie de Fallot, 104
thalassémie majeure, 45
thrombose anévrysmale, 84
thrombus, 65
tumeurs cardiaques, 67

U

ulcère athéromateux pénétrant, 87

V

vaisseaux pulmonaires, 115
valeurs normales, 12, 14, 15
valvulopathies, 51
variantes anatomiques, 141
variantes anatomiques des artères
coronaires, 129
veines pulmonaires, 115
ventricule unique, 108
viabilité myocardique, 27