**Évaluation non invasive des maladie valvulaires de l’adulte par imagerie de résonance magnétique cardiaque**.

Asefeh Defaee Boeini, Bernhard L. Gerber

Cliniques St. Luc, Université Catholique de Louvain

(UCLouvain), Bruxelles, Belgique.

# Introduction

Les progrès récents ont permis à l'imagerie par résonance magnétique cardiaque (IRMc) de devenir une technique essentielle dans l'évaluation non invasive des patients atteints de pathologie valvulaires1. En effet, tout comme l'échocardiographie, l’IRMc peut évaluer la morphologie et la gravité de la sténose et de la régurgitation des 4 valves cardiaques. Les principaux atouts de l’IRMc par rapport à d'autres techniques sont sa capacité à quantifier la sévérité des régurgitations, à mesurer avec précision les volumes ventriculaires gauche et droite ainsi que leur fonction, à évaluer les grands vaisseaux thoraciques, et enfin à détecter les la fibrose myocardique ou la nécrose myocardique.

# Principes généraux d'évaluation des maladies valvulaires en IRM

Tout comme l'échocardiographie, l'évaluation des patients présentant une maladie cardiaque valvulaire exige une approche globale, évaluant la morphologie et la fonction des 4 valves cardiaques en termes d'ouverture et de fermeture. Pour chaque valve, le degré d'ouverture et de fermeture peut être évalué à l'aide de mesures anatomiques (mesures des surfaces d'ouverture ou de fermeture de la valve) et physiologiques (gradients de pression et volumes de régurgitation), vu que ces deux paramètres sont complémentaires.

## Evaluation de la morphologie valvulaire

L’évaluation de la morphologie des valves se fait généralement sur les images cine (SSFP). Ceux-ci permettent généralement de détecter l’anomalie de morphologie des valves, tel que le prolapsus ou le rétrécissement.

L'identification des sténoses et régurgitations valvulaires peut être approchée visuellement en identifiant la perte de signal (« vide de signal ») due à l'épuisement des protons en mouvement sur l'imagerie de cine SSFP ou les images d'écho de gradient. La perte de signal se fait en amont de tout rétrécissement valvulaire et en aval de la valve régurgitante2. Les techniques de type SSFP sont généralement moins sensibles pour la détection de ces phénomènes que les séquences en écho de gradient. L’identification de la taille du vide de signal à une utilité limitée pour évaluer la sévérité des sténoses ou insuffisances. En revanche, elle permet de déterminer la direction et l'emplacement des jets, d’une importance cruciale pour comprendre le mécanisme de dysfonctionnement de la maladie valvulaire, en particulier pour identifier un prolapsus valvulaire.

En outre, en utilisant des séquences de type turbospin-écho en pondération T1, T2 avec saturation de graisse ou post-contraste, l’IRMc permet dans une certaine mesure de caractériser les tissus valvulaires. Ceci peut être utile pour différencier quelques tumeurs valvulaires de grande taille telles que le myxome, la calcification ou le lipome ou les structures voisines aux valves. Cependant la caractérisation tissulaire est souvent limitée par la petite taille et l’importante mouvement des valves. Par conséquent, les structures valvulaires très petites ou très mobiles telles que les végétations, les ruptures de chordages, les excroissances de Lambl et les tumeurs valvulaires comme les fibroélastomes ne sont généralement pas aussi bien visualisées par IRMc que par ETO et la caractérisation tissulaire de ce type de structures par IRMc est très difficile.

## Evaluation des sténoses valvulaires

***La sténose valvulaire*** peut être évaluée à la fois anatomiquement et physiologiquement, c'est-à-dire 1) en mesurant la surface d'ouverture de la valve, soit par planimétrie directe de la valve anatomique, soit par calcul indirect de l'ouverture effective de la valve en utilisant l’équation de continuité, et 2) en évaluant la sévérité des gradients de pression à travers la valve sténosante.

Ces deux paramètres fournissent des estimations complémentaires mais indépendantes de la gravité de la sténose, puisque les gradients de pression dépendent de la quantité de débit passant par la valve sténosante.

***La planimétrie directe de la surface d'ouverture anatomique*** de la valve (Figure 2) peut être effectuée en prescrivant une pile d'images cinés à travers la valve sténosante. La zone d'ouverture minimale à l'extrémité des feuillets de valve est alors soigneusement tracée par planimétrie sur une image où la valve est entièrement ouverte c.-à-d. en mid-systole pour les valves aortiques3, 4 et pulmonaires et en proto-diastole pour les valves mitrales et tricuspides. Une résolution spatiale et temporelle élevée est requise pour une plus grande précision des mesures. L'excellent contraste sang-myocarde et le rapport signal/bruit élevé fourni par les séquences SSFP permettent généralement une délimitation précise de la valve contre le sang, mais les pièges potentiels sont des artefacts de vide de signal résultant de calcifications ou flux turbulents.

Comme en échocardiographie-Doppler, la surfacede la valve peut également être calculée indirectement à partir des mesures de vitesse de contraste de phase au moyen de ***l'équation de continuité*** (Figure 3). En effet en présence d’un obstruction dans un canal d'écoulement, le produit de la surface d'écoulement et de la vitesse d'écoulement sera constant à la partie obstruée et non obstruée du canal d'écoulement, selon l'équation de continuité5 : A x V - A' x V' où V et A sont la vitesse moyenne spatiale et la surface proximale à l'obstruction, et V' et A' sont la vitesse moyenne spatiale et la surface à l'obstruction. Si V, A et V' sont connus, la surface valvulaire peut être calculée en réorganisant l'équation 1 comme suit : A' = A x V/V'.

La méthode nécessite donc l'évaluation de la vitesse maximale par imagerie de contraste de phase à 2 niveaux : au maximum de la convergence et à un autre niveau de référence. Elle nécessite également une mesure de la surface de référence, soit par planimétrie soit en mesurant le diamètre de la chambre de chasse et en calculant la surface de référence (2r2). Il s’agit donc de réaliser les bonnes coupes afin de déterminer la vitesse d’écoulement maximal ainsi que la surface de référence en évitant les artéfacts liés à l’aliasing ou au mouvement cardiaque.

Les mesures des surfaces valvulaires par équation de continuité sont généralement légèrement plus petites que celles obtenues par planimétrie directe6. Ceci est lié au fait que les deux méthodes mesurent deux zones différentes : l'équation de continuité estime la surface valvulaire efficace,c'est-à-dire une zone virtuelle de convergence des flux, située au-delà de l'orifice véritable de valve anatomique et qui est généralement plus petite que la véritable surface anatomique mesurée par planimétrie. Le rapport de la zone anatomique à la valve efficace est souvent appelé coefficient de contraction et est généralement autour de 0,85 pour la valve aortique.

Comme en échocardiographie, ***les gradients de pression moyens et maximaux*** peuvent également être estimés en IRMc à partir des données de l'imagerie de contraste de phase encodée de vitesse en utilisant l'équation simplifiée de Bernouilli (ΔP = 4v2). Cette hypothèse est valable pour les sténoses qui ne sont ni trop sévères ni trop longues (ce qui provoque un changement de flux laminaire à turbulent). Comme pour l'équation de continuité, pour éviter des erreurs de mesures, il est important que. 1) Le débit soit mesuré à l'emplacement de sa plus forte accélération et 2) la vitesse choisie soit suffisamment élevée pour éviter l'aliasing.

## Evaluation des régurgitations valvulaires

Comme pour l’évaluation des sténoses valvulaires, l'évaluation quantitative de la ***sévérité des régurgitations*** exige des mesures de paramètres anatomiques (mesure de la surface de l’origine régurgitant) et physiologiques (utilisation des images de contraste de phase).

***L'évaluation de la surface de l’orifice régurgitant*** est effectuée dans une approche similaire à la planimétrie de l'ouverture de la valve, c'est-à-dire en prescrivant des tranches de court axe en série perpendiculaires à l'orifice de la valve, et en dessinant le contour de l'orifice régurgitant à valve fermée. La même prescription que pour l'évaluation des sténoses peut être utilisée, si les jets régurgitants sont centraux. Pourtant, si les jets régurgitants sont excentriques, ce qui se produit le plus souvent lorsqu'un ou plusieurs feuillets présentent un prolapsus, il faut prendre soin de prescrire les coupes court axe perpendiculairement à la direction du jet régurgitant, afin d'éviter la surestimation de l’orifice régurgitant.

***La quantification du volume régurgitant*** peut être effectuée de plusieurs façons.

Pour les valves aortique et pulmonaire, elle peut être ***évaluée directement*** en prescrivant une image de contraste de phase dont le plan est situé juste au-delà de la valve incontinente. Cette technique, qui ressemble à l’échographie Doppler, permet de mesurer les vitesses de déplacement du sang dans chaque pixel de l’image. En multipliant la surface mesurée par l'intégrale des vitesses au fil du temps on peut calculer non seulement le volume éjecté, mais également le volume régurgité par la valve incontinente. La sévérité de la régurgitation peut être exprimée soit en valeur absolue, soit en pourcentage du flux éjecté (fraction régurgitante). Puisque l'aorte et l'artère pulmonaire ont une forme circulaire et le mouvement cardiaque relativement moins marqué, l'approche directe est mieux adaptée pour évaluer des volumes régurgitant des valves aortique et pulmonaire que de la valve mitrale. L’avantage essentiel de la quantification du volume de régurgitation aortique et pulmonaire est que cette technique est supérieure à l’échocardiographie en termes de précision et reproductibilité, en particulier en présence de flux de régurgitation excentriques ou multiples.

A cause de l’important mouvement des valves mitrales et tricuspides, pour la quantification du volume régurgitant de ces valves, une approche indirecte est préférée à la mesure directe du volume au niveau de la valve. Ainsi le volume régurgitant mitral ou tricuspide peut être calculé en comparant les volumes d’éjection ventriculaire droit et gauche calculés à partir de la méthode de Simpson sur les tranches de série à axe court dans le VG et le VD au volume d'éjection dans l'aorte ou la valve pulmonaire en utilisant l’image de contraste de phase. Le volume régurgitant mitral est ensuite calculé comme la différence entre le volume éjecté du VG (Simpson) moins le volume d’éjection aortique (calculé à partir de l'imagerie de contraste de phase dans la racine aortique). De même, le volume régurgitant tricuspide est calculé comme la différence entre le volume éjecté du VD (par Simpson) et le volume éjecté dans l'artère pulmonaire (par l’image de contraste de phase) (Figure 5). Une autre approche utilisable uniquement s'il n'y a pas d'autre régurgitation valvulaire associée est de comparer les volumes d'éjection ventriculaires gauche et droit calculés par la méthode de Simpson. Les pièges de l'utilisation des méthodes de contraste de phase sont des inexactitudes dans le volume d’éjection en raison des décalages de phase dus aux courants Eddy ou Maxwell. Pour minimiser ces erreurs, les temps d'écho (TE) doivent être aussi courts que possible. En outre, pour éviter l'aliasing, la vitesse d'encodage doit être fixée plus haut que la vitesse maximale rencontrée.

Plus récemment des séquences ***d’évaluation des flux en 4D (4D flow)*** ont également vu le jour. Cette technique permet de mesurer simultanément les vélocités dans 3 directions perpendiculaires dans un volume de tissu. Elle permet donc de quantifier la sévérité des fuites valvulaires dans n’importe quelle direction à n’importe quel endroit du cœur. Son avantage principal est de permettre de suivre le mouvement des valves dans le cycle cardiaque, ce qui permet une encore meilleure précision des mesures de l’insuffisance aortique et pulmonaire et également une mesure directe du volume regurgitant au niveau des valves mitrale et tricuspide. Cette technique est particulièrement utile pour l’évaluation des valvulopathies complexes et des quantifications des shunts dans les cardiopathies congénitales. Son inconvénient est une durée d’acquisition plus longue (5-7 minutes).

## Evaluation des conséquences des valvulopathies sur les ventricules.

En plus d'évaluer la sévérité du dysfonctionnement de valve, il est important d'évaluer les conséquences de la maladie de valve sur les volumes ventriculaires gauche et droite, la fonction systolique et la fibrose intramyocardique. En effet, de tels paramètres fonctionnels sont généralement nécessaires pour la prise en charge clinique chez les patients atteints d'une maladie valvulaire, et en particulier pour la décision de procéder à une chirurgie de remplacement ou de réparation valvulaire. Un des atouts principaux de l’IRMc est de pouvoir mesurer précisément les volumes ventriculaires gauche et droit, la masse et la fraction d'éjection, avec une précision supérieure et une meilleure reproductibilité inter-étude que l'échocardiographie 2D. L’IRMc est donc particulièrement bien adapté pour évaluer les conséquences pathophysiologiques de la maladie valvulaire sur le ventricule gauche ou droit. Puisque dans beaucoup de types de maladie valvulaires, le moment de la chirurgie est déterminé par les répercussions fonctionnelles de la maladie sur les volumes ventriculaires, l’IRMc permet de détecter le moment optimal d'intervention. En raison de sa haute précision, l’IRMc est la méthode de choix pour le suivi des volumes VG et VD, ainsi que les masses chez les patients au fil du temps. Cela peut être particulièrement intéressant dans les études évaluant les résultats de la chirurgie valvulaire sur les volumes ventriculaires, la masse et la fonction.

Enfin, l’imagerie de résonance magnétique cardiaque a la capacité unique de caractériser le myocarde par des séquences d’écho de spin T1 et T2 et encore mieux par des séquences d'écho de gradient après injection de contraste (rehaussement tardif). On peut ainsi détecter la fibrose myocardique ou la nécrose dans certains types de maladie valvulaire et fournir des informations précieuses sur la viabilité des tissus en présence de la maladie valvulaire. Cette dernière information est particulièrement importante lors de l’évaluation de la balance bénéfice-risque chez les patients souffrant de cardiopathie valvulaire à fonction sévèrement altérée, afin de prédire le remodeling inverse.

# Place de la résonance magnétique cardiaque dans l’évaluation de valvulopathies spécifiques.

L’échocardiographie reste la technique de choix pour l’identification et l’évaluation de la sévérité dans la plupart des valvulopathies. L’IRMc joue généralement un rôle de technique d’affinement qui permet de préciser le diagnostic et préciser la sévérité de lésions quand évaluation par échocardiographie est difficile ou inconcluante. Vu le manque de exactitude de l’échocardiographie dans l’évaluation des fuites valvulaires, elle joue surtout un rôle important pour l’évaluation précises des régurgitations valvulaires, et en particulier pour l’évaluation des insuffisance aortiques et des évaluations des valvulopathies du ventricule droit (insuffisances pulmonaires et tricuspides). Elle est cependant également utile dans l’insuffisance mitrale, ou son rôle est surtout dans l’évaluation de la sévérité de la fuite si les lésions sont complexes et difficiles à évaluer par échocardiographie (jets multiples et excentriques). Dans la sténose aortique L’IRMc joue surtout un rôle pour évaluer la sévérités de la sténose quand il y a discordance entre gradients et surface anatomique (ie sténoses à bas gradient paradoxal). Finalement l’IRM est utile dans toute valvulopathie avec dysfonction systolique afin d’évaluer la viabilité myocardique et détecter des cardiomyopathies tels que l’amyloïdose cardiaque. Elle est également cruciale pour l’évaluation de l’anatomie et des dimensions des grands vaisseaux (aorte et artère pulmonaire).

## Valvulopathies aortiques.

### Evaluation de l’anatomie

Pour l’évaluation de l’anatomie de la valve aortique on peut prescrire une série de coupes fines court axe, perpendiculaires à la vue 3 cavités passant par la chambre de chasse du VG. Ensuite pour évaluer la mobilité de chacune des cuspides on prescrit 3 coupes radiales long axe séparés de 60° et passant par chacun des feuillets aortiques. Ceci permet non seulement d’évaluer le degré d’ouverture de chaque feuillet en systole mais également de déterminer le point de coaptation des feuillets en diastole. On peut ainsi de détecter le prolapsus ou la restriction comme mécanisme de l’insuffisance. En outre, ces coupes permettent d'évaluer la dilatation des sinus aortiques, la jonction sino-tubulaire ou l'aorte ascendante. La sévérité de la régurgitation aortique est évaluée au moyen d’une image de contraste de phase près de la valve aortique, typiquement au niveau de la jonction sino-tubulaire. Enfin, l'évaluation doit être complétée par l'évaluation anatomique de l'aorte ascendante et descendante sur des images d'angiographie 3D de contraste.

L’IRMc peut ainsi jouer un rôle pour l’évaluation de la morphologie valvulaire, et en particulier pour distinguer les valves bi- ou tricuspides7 si cela n’est pas possible en échocardiographie transthoracique et si on ne veut pas faire subir au patient un examen d’échographie transoesophagienne.

### Insuffisance aortique

Tandis que l'échocardiographie demeure la technique de choix pour le diagnostic initial de l’IA, la IRMc joue un rôle important pour l’évaluation des patients présentant une IA, ceci du fait que la quantification de l'IA par l'échocardiographie est difficile et souvent relativement imprécise. En effet en échocardiographie une approche multiparamétrique a été proposée pour l’évaluation de l’insuffisance aortique8. Bien que la quantification absolue soit possible en utilisant la méthode PISA, elle est souvent difficile à réaliser, en particulier en présence de jets régurgitants excentriques comme on en rencontre fréquemment dans les valves bicuspides et les prolapsus.

La IRMc permet une mesure directe du volume de l’insuffisance aortique par technique de contraste de phase. Son avantage principal est que la méthode est insensible à l’anatomie valvulaire et la direction du jet de l’IA. Dès lors elle permet une mesure plus précise et plus reproductible que l’échocardiographie9, 10. De plus, la IRMc permet dans l’IA une évaluation précise des volumes ventriculaires9 et de la fraction d’éjection qui peuvent être utiles pour le suivi des patients et décider des indications opératoires. Des travaux récents ont démontré que l’évaluation de la sévérité de l’insuffisance aortique par IRMc a une valeur pronostique supérieure à l’echocardiographie pour prédire l’évolution vers des indications opératoires11.

Un autre atout de la IRMc dans le suivi des patients présentant une IA est la capacité de mesurer précisément la taille de la racine aortique. Ceci est particulièrement important dans le suivi des patients avec insuffisance aortique lié à une dilatation de la racine aortique et tout particulièrement chez les patients atteints de bicuspidie aortique. Dans ce contexte l’IRMc permet aussi de détecter et évaluer la présence concomitante d’une coarctation aortique.

L’avantage de la IRMc par rapport à la tomodensitométrie est d’une part de ne pas nécessiter l’injection de produit de contraste chez des patients allergiques à l’iode et ceux avec une insuffisance rénale préexistante risquant de s’aggraver et d’autre part de ne pas exposer les patients aux effets d’irradiations ioniques, ce qui est surtout important chez les patients jeunes.

### Rétrécissement aortique

L’ETT reste la technique de choix pour l'évaluation de la grande majorité des patients souffrants de rétrécissement aortique (RA). L’intérêt de la IRMc réside chez les patients peu échogènes ou en cas de résultats discordants surtout dans les cas de RA à bas gradient-bas débit.

L'évaluation de la sévérité du RA par IRMc peut être effectuée à la fois par planimétrie directe de l'ouverture de la valve anatomique sur les images ciné prescrites à l'extrémité des feuillets de valve aortique et par le calcul de la surface valvulaire en utilisant l'équation de continuité. Les deux techniques montrent une bonne corrélation avec l’ETT, mais la planimétrie tend à fournir des surfaces de valve aortique légèrement surévaluées par rapport à l'équation de continuité. L'imagerie de contraste de phase en IRMC peut également estimer la vitesse maximale au travers de la valve et donc de calculer le gradient de pression maximale en utilisant l'équation modifiée de Bernouilli. Les image de Cine SSFP permettent une meilleure visualisation des cuspides aortiques par rapport à l’ETT, ce qui rend la technique plus précise pour déterminer la morphologie. De même, la IRMC permet des évaluations plus pointues de la masse du VG et mieux caractériser le degré d’hypertrophie dans les RA par rapport à l’ETT.

Le RA à bas gradient-bas débit est une autre situation dans laquelle la IRMC pourrait jouer un rôle important. Tout comme l'échocardiographie-Dobutamine, la IRMC-Dobutamine peut être utilisée pour diagnostiquer les vrais RA serrés12. En outre elle permet d’évaluer la viabilité myocardique en case de RA à bas gradient avec fonction altérée. La capacité récemment démontrée de la IRMC d'identifier les zones de rehaussement tardifs chez les patients atteints de RA est d'un grand intérêt clinique, elle est corrélée à la fibrose histologique et prédit l'amélioration fonctionnelle et le pronostic dans le RA13, 14. Plus récemment des travaux ont également montré la valeur prédictive de l’augmentation du volume extracellulaire et du temps T1 natif dans la RA, tous deux marqueurs d’une fibrose diffuse histologique15. Finalement l’IRMC est aussi utile du fait qu’elle permet également de détecter la présence d’amyloïdose myocardique, particulièrement chez les patients âgés avec sténose aortique et hypertrophie démesurée présentant une insuffisance cardiaque à fonction préservée (HfrEF).

Enfin, comme en tomodensitométrie, l’imagerie de IRMC est utile dans le RA par le fait qu’elle peut évaluer avec précision l’ensemble de l’aorte ascendante, ce qui présente un intérêt particulier lors du suivi des bicuspidies ou des dilatations de la racine aortique. Par ailleurs, une évaluation fine de l'aorte ascendante et de la chambre de chasse du VG est essentielle avant l'implantation percutanée de valves aortiques (TAVI).

## Valvulopathies mitrales

### Evaluation de l’anatomie

Pour l’évaluation de l’anatomie de la valve mitrale à la suite d'une imagerie standard du ventricule gauche, une série de coupes obliques est réalisée sur la valve mitrale, à la ligne de coaptation, approximativement parallèle à la vue 3 cavités. Cette série d'images permet de visualiser chacun des feuillets (A1-P1, A2-P2, A3-P3). Une autre série de coupes obliques acquises à la ligne de coaptation des feuillets à chaque extrémité de la valve permet d'apprécier les commissures.

### Insuffisance mitrale

L’ETT avec Doppler couleur reste la technique la plus couramment utilisée pour l'évaluation de la sévérité, de la réparabilité et des complications hémodynamiques de l’IM. Les lignes de conduite proposent une évaluation multiparamétrique pour la quantification de la valvulopathie16. La méthode PISA avec calcul le volume régurgitant et la surface de l’orifice régurgitant est la technique de choix. Cependant, des études antérieures suggéraient que les paramètres échocardiographiques utilisés dans l'évaluation PISA 2D pour estimer la gravité de l'IRM, tels que la surface de l'orifice régurgitant effectif dérivé de PISA (PISA-EROA), la largeur de la vena contracta (VCW) et la zone du jet Doppler couleur ne sont que modérément reproductibles17. En effet, il existe plusieurs situations dans lesquelles les hypothèses de la méthode PISA sont violées. En effet, la géométrie du PISA peut varier en fonction de la géométrie de l’orifice et des feuillets de la valve mitrale entourant cet orifice. Cette variabilité est particulièrement observée dans la régurgitation mitrale fonctionnelle où la coquille PISA présente des formes hémi-elliptiques allongées18, conduisant à une sous-estimation du volume régurgitant réel. Inversement, la présence d'un mur de contrainte, notamment dans les régurgitations excentriques, fausse le champ d'écoulement convergent et les hypothèses de symétrie hémisphérique du PISA, conduisant à une surestimation des débits calculés19. Des erreurs supplémentaires dans la mesure du débit régurgitant PISA résultent de l’hypothèse que la zone convergente aura un aspect hémisphérique. Cependant, en réalité, en raison de l’incapacité de visualiser un écoulement perpendiculaire au signal Doppler incident, la coque de la surface isovélocétique apparaît avec une géométrie urchinoïde plutôt qu’hémisphérique20 ce qui peut fausser l’estimation PISA résultante. Une autre erreur dans les mesures IRMC par PISA peut être provoquée par la variabilité trame par trame de la distance PISA20 et dans des jets changeant en intensité lors du cycle cardiaque (p.ex. des jets télésystoliques).

La IRMc joue donc une rôle important de vérification de la sévérité de l’insuffisance mitrale dans les cas où la quantification par échocardiographie est difficile ou discordante. En effet la IRMc peut évaluer la sévérité de l’IM par plusieurs approches. La méthode de choix, qui n'est pas affectée par les insuffisances des autres valves, est le calcul du volume régurgitant mitral comme la différence entre le volume éjecté du VG utilisant la méthode de Simpson et le calcul du volume d’éjection aortique systolique par imagerie de contraste de phase dans la racine aortique. La quantification peut également être effectuée en comparant les volumes éjectés du VG et du VD. La méthode est précise, toutefois seulement applicable en l'absence d'autres valvulopathies. Une autre approche récemment proposée est par planimétrie directe de la surface de l’orifice régurgitant anatomique sur les coupes court axe à travers la valve mitrale. Les mesures de la sévérité de l’IM par IRMc ne présentent qu’une corrélation modérée avec celle fait en échocardiographie10, 21-23. Cependant la mesure de la sévérité de IM par IRMc est plus reproductible que celle par échocardiographie10 et prédit mieux le remodelage inverse du ventricule après chirurgie de réparation valvulaire que l’échocardiographie22. Également, la mesure des volumes régurgitants et la fraction de régurgitation de l’IM en IRMc prédit mieux d’une part l’évolution vers la survenue de symptômes ou de critères d’indications chirurgicales24 et d’autre part la mortalité globale des patients par rapport à l’échocardiographie25. Ces observations font supposer que l’IRMc est plus précise que l’échocardiographie pour l’évaluation de l’IM.

L’imagerie de résonance magnétique cardiaque peut également avoir un rôle secondaire pour déterminer le mécanisme de la régurgitation26. À cette fin, des coupes cine en série sont réalisées perpendiculaires à la vue 3 cavités du VG passant par la chambre de chasse. Cela permet une évaluation complète de la présence de prolapsus ou de restriction dans toutes les divisions des deux feuillets mitraux. En utilisant une prescription de coupes à travers la valve mitrale, il est également possible de reconstruire l'appareil mitral en 3D et d'évaluer les altérations géométriques telles qu’une dilatation de l’anneau mitral et une surface de coaptation accrue dans la régurgitation mitrale fonctionnelle. Cependant, à cette fin, l’echocardiographie surtout transoesophagienne est plus performante en raison de résolutions temporelle et spatiale meilleures. Pour les mêmes raisons, l’IRMc est moins performante que l’échographie pour visualiser les végétations dans les cas d’endocardite mitrale et est donc peu utile pour cette indication.

En outre, tout comme pour l’insuffisance aortique, l’IRMC joue un rôle important pour l'évaluation plus précise de la fraction d’éjection et du remodelage ventriculaire27 du VG. Elle permet l’évaluation de la viabilité myocardique chez les patients présentant une IM fonctionnelle ou ischémique due à la cardiopathie ischémique ou à une cardiomyopathie dilatée. Cette technique permet par exemple de détecter la nécrose de muscle papillaires dans ces IM fonctionnelles28. La fibrose myocardique focale détecté par IRMc semble également avoir un rôle important dans l’arrythmogénèse dans les prolapsus mitraux29-31.

### Rétrécissement mitral

L’IRMc peut jouer évaluer les rétrécissements mitraux par 2 principes. En effet tout comme au Doppler continu à l’ETT, l’IRMc peut estimer les gradients de pression moyens à travers la valve sténosante sur l’image de contraste de phase avec une bonne corrélation entre les deux techniques. En outre, comme à l'échocardiographie, la surface valvulaire mitrale peut être calculée indirectement au moyen de la méthode de temps de demi-pression, selon la formule : MVA (cm2) = 220/T1/2, où MVA est zone de valve mitrale et T1/2 est la pente de la vitesse à laquelle les gradients de pression atrioventriculaire diminuent pendant la diastole. Un meilleur moyen d'estimer la surface valvulaire est probablement la planimétrie directe de la zone de la valve sur des coupes court axe en série à travers la valve mitrale. Globalement vu la rareté de cette pathologie et l’utilité générale de l’échographie TT et TO dans ce cas, il n'y a typiquement pas de rôle majeur de l’IRMs dans l'évaluation des patients présentant un RM.

# Valvulopathies tricuspides

Puisque la quantification de l’insuffisance tricuspide et la visualisation de la valve tricuspide sont difficiles par échocardiographie, l’IRMc a une place importante dans l’évaluation de la sévérité et du mécanisme de la régurgitation tricuspide, ainsi que dans les maladies touchant le VD en général. En effet L’IRMc permet d’évaluer la valve tricuspide sur des coupes court-axe passant par la chambre de chasse du VD. Ceux-ci peuvent être utilisés pour évaluer la surface d'ouverture, le diamètre de l'anneau et peuvent également identifier le prolapsus des feuillets. Le mouvement des feuillets septal et postérieur peut être mieux évalué sur une vue 4 cavités ainsi que sur des coupes axiales, alors que l’évaluation du feuillet antérieur peut être mieux évalué sur une coupe 2 cavités du VD. La sévérité de l’IT peut être calculée par la différence entre le volume d’éjection du VD (en utilisant la méthode Simpson) et le volume d’éjection à travers la valve pulmonaire (par imagerie de contraste de phase dans l’artère pulmonaire).

L’avantage principal de l’IRM est sa précision dans l’évaluation de la fonction ventriculaire droite qui est un facteur majeur de pronostic dans l’insuffisance tricuspide. En outre l’IRMc permet d’identifier des causes de la dilatation et dysfonction du ventricule droit, telles l’identification de la nécrose ischémique du ventricule droit, l’identification de la dysplasie arythmogène du VD, la détection des shunts intra et extra-cardiaques et en particulier le retour veineux pulmonaire anormal, etc. Elle peut aussi faire le diagnostic différentiel d’autres cardiomyopathies qui mènent fréquemment à une dysfonction ventriculaire droite tel que les cardiopathies restrictives et particulièrement l’amyloïdose myocardique.

# Valvulopathies pulmonaires

Puisque l’ETT et l’ETO ont des capacités limitées pour visualiser la morphologie de la valve pulmonaire et les parties sous- et supravalvulaires de la chambre de chasse du VD, et pour évaluer la sévérité de l’IP, la résonance magnétique cardiaque est la méthode de choix pour l'évaluation complète de cette valve. Pour ce faire, l’évaluation de la valve pulmonaire par IRMc est réalisée de manière progressive. D'abord une coupe axiale et une coupe de ciné passant la chambre de chasse du VD est réalisée. Ceci permet généralement d'apprécier si l'obstruction de de la chambre de chasse est sous-valvulaire ou valvulaire. La partie supra-valvulaire ou l'artère pulmonaire peut également être visualisée sur les images de contraste angiographique. À partir de la chambre de chasse, on peut alors prescrire une série de coupes court axe minces (5 mm) perpendiculaires à travers la valve pulmonaire. Ceux-ci permettent d'apprécier la surface et la morphologie de la valve pulmonaire. L’évaluation de la sévérité de la régurgitation pulmonaire est effectuée en réalisant un plan d'imagerie de contraste de phase sur un plan de la chambre de chasse du VD juste au-delà de la valve pulmonaire mais avant la bifurcation de l'artère pulmonaire. Les artères pulmonaires peuvent être évaluées sur des tranches axiales de SSFP ou sur une angiographie de contraste.

La valvulopathie pulmonaire isolée est relativement rare chez les patients adultes. Elles se rencontrent essentiellement chez des patients congénitaux après chirurgie de la tétralogie de Fallot. Elle peut également se présenter dans le syndrome carcinoïde ou en cas d’abus de sérotoninergiques. L’IRMc est indiquée chez ces patients et particulièrement chez les patients avec tétralogie de Fallot pour évaluer le degré de régurgitation pulmonaire et le degré de dilatation du ventricule droit. En général l’opération de remplacement de la valve pulmonaire est considérée indiquée quand en présence d’une insuffisance pulmonaire sévère le volume diastolique du ventricule droit dépasse 160 ml/m2 et ou si le volume télésytolique indexé dépasse 82 ml/m232. L’IRMc est donc la technique de choix de suivi régulier de ce type de patients avec insuffisance pulmonaire chronique.

## Évaluation des valves prothétiques

L'évaluation des valves prothétiques par IRMc est sûre et possible pour toutes les valves prothétiques. Cependant, les images peuvent être artéfactées à des degrés variables selon la quantité et le type de métal contenue dans la prothèse. Les valves mécaniques produisent des artéfacts empêchant l'évaluation de leur anatomie et de leur mouvement sur les images ciné SSFP. Les valves bioprothétiques sans stent et les homo- et les autogreffes n'ont pas de pièces métalliques. Par conséquent, le mouvement des feuillets peut être représenté sans aucun artéfact. L'ampleur des artéfacts pour les bioprothèses stentées dépend du type et de la quantité de métal contenue dans l'endoprothèse. Pour la plupart des bioprothèses, les artéfacts sont relativement mineurs et la morphologie des feuillets et la surface d'ouverture peuvent être visualisées. Par contre, les bioprothèses stentées d’implantation percutanée génèrent des artéfacts majeurs empêchant toute visualisation des feuillets. Les chirurgies de réparation valvulaires n’entrainent des artéfacts que lorsqu’un anneau de renforcement est implanté, selon l’anneau employé.

Dans l'évaluation générale de la sévérité des insuffisances valvulaires prothétiques, la mesure des vitesses de débit maximal régurgitant est faisable pour toutes les prothèses, puisque les séquences de contraste de phase sont moins affectées par les artéfacts d'homogénéité sur le terrain. Le rôle principal de L’IRMc se situe dans l’évaluation de la sévérité des fuites des prothèses aortique et spécialement des fuites paraprothétiques post TAVR. En effet l’évaluation de ce type de fuites est particulièrement difficile par échocardiographie. Des études récentes ont démontré que la quantification de l’insuffisance aortique paraprothétique post TAVR par IRMc a une valeur pronostique meilleure que l’échocardiographie33. L’IRMc est donc indiqué pour l’évaluation de la sévérité de l’IA dans cette indication.

Par contre, l’évaluation du rétrécissement prothèses est beaucoup plus arbitraire et l’IRMc ne devrait pas être utilisée à cette fin.

# Conclusions

Bien que l'échocardiographie transthoracique et transoesophagienne demeurent aujourd'hui les outils primaires pour l'évaluation des patients présentant une valvulopathie, l’imagerie de résonance magnétique cardiaque est devenue une technique importante et complémentaire. En effet, l’IRMc est capable d'évaluer la morphologie et la fonction des 4 valves du cœur avec une grande précision. Cette technique a l'avantage de fournir une qualité d'image plus fiable que l'échocardiographie, et peut donc être utilisée comme méthode secondaire pour confirmer les résultats lorsque l'échocardiographie est douteuse ou que l’image est de mauvaise qualité ou lorsque les résultats sont inconsistants avec la clinique. Plus important encore, l’imagerie de résonance magnétique cardiaque permet une meilleure quantification de la sévérité des insuffisances valvulaires et des volumes ventriculaires gauches et droits et la fonction par rapport à l'échocardiographie. Ses capacités tridimensionnelles permettent également la visualisation individuelle des feuillets valvulaires ainsi que de la racine aortique, permettant ainsi de caractériser avec précision les mécanismes de dysfonctionnement. Par conséquent, l’IRMc est la méthode de choix pour quantifier les insuffisances aortiques, mitrales, tricuspides et pulmonaires. Pour l'évaluation de l’insuffisance mitrale fonctionnelle, l’IRMc joue un rôle important pour des mesures précises des volumes du VG, de la fonction et surtout de la viabilité. L’IRMc est aussi extrêmement utile dans l’évaluation des volumes ventriculaires droits et de la fraction d’éjection du ventricule droit. Enfin, dans tous les types de valvulopathie, l’IRMc a la capacité unique d'évaluer les conséquences sur la fonction myocardique, en permettant l’évaluation du myocarde et la présence de fibrose ou de nécrose. Cette évaluation de la fibrose myocardique a été démontrée avoir une valeur pronostique, en particulier dans le rétrécissement aortique.

# References

1. Cawley PJ, Maki JH and Otto CM. Cardiovascular magnetic resonance imaging for valvular heart disease: technique and validation. *Circulation*. 2009;119:468-78.

2. Kilner PJ, Manzara CC, Mohiaddin RH, Pennell DJ, Sutton MG, Firmin DN, Underwood SR and Longmore DB. Magnetic resonance jet velocity mapping in mitral and aortic valve stenosis. *Circulation*. 1993;87:1239-48.

3. John AS, Dill T, Brandt RR, Rau M, Ricken W, Bachmann G and Hamm CW. Magnetic resonance to assess the aortic valve area in aortic stenosis: how does it compare to current diagnostic standards? *Journal of the American College of Cardiology*. 2003;42:519-526.

4. Debl K, Djavidani B, Seitz J, Nitz W, Schmid FX, Muders F, Buchner S, Feuerbach S, Riegger G and Luchner A. Planimetry of aortic valve area in aortic stenosis by magnetic resonance imaging. *Invest Radiol*. 2005;40:631-636.

5. Caruthers SD, Lin SJ, Brown P, Watkins MP, Williams TA, Lehr KA and Wickline SA. Practical value of cardiac magnetic resonance imaging for clinical quantification of aortic valve stenosis: comparison with echocardiography. *Circulation*. 2003;108:2236-2243.

6. Pouleur A-C, de Waroux J-BlP, Pasquet A, Vancraeynest D, Vanoverschelde J-LJ and Gerber BL. Planimetric and continuity equation assessment of aortic valve area: Head to head comparison between cardiac magnetic resonance and echocardiography. *Journal of Magnetic Resonance Imaging*. 2007;26:1436-1443.

7. Goffinet C, Kersten V, Pouleur AC, JB lPdW, Vancraeynest D, Pasquet A, Vanoverschelde JL and Gerber BL. Comprehensive assessment of the severity and mechanism of aortic regurgitation using multidetector CT and MR. *Eur Radiol*. 2010;20:326-336.

8. Lancellotti P, Tribouilloy C, Hagendorff A, Popescu BA, Edvardsen T, Pierard LA, Badano L and Zamorano JL. Recommendations for the echocardiographic assessment of native valvular regurgitation: an executive summary from the European Association of Cardiovascular Imaging. *European heart journal cardiovascular Imaging*. 2013;14:611-44.

9. Lee JC, Branch KR, Hamilton-Craig C and Krieger EV. Evaluation of aortic regurgitation with cardiac magnetic resonance imaging: a systematic review. *Heart (British Cardiac Society)*. 2018;104:103-110.

10. Cawley PJ, Hamilton-Craig C, Owens DS, Krieger EV, Strugnell WE, Mitsumori L, D'Jang CL, Schwaegler RG, Nguyen KQ, Nguyen B, Maki JH and Otto CM. Prospective comparison of valve regurgitation quantitation by cardiac magnetic resonance imaging and transthoracic echocardiography. *Circulation Cardiovascular imaging*. 2013;6:48-57.

11. Myerson SG, d'Arcy J, Mohiaddin R, Greenwood JP, Karamitsos TD, Francis JM, Banning AP, Christiansen JP and Neubauer S. Aortic regurgitation quantification using cardiovascular magnetic resonance: association with clinical outcome. *Circulation*. 2012;126:1452-60.

12. Barone-Rochette G, Pierard S, Seldrum S, De Meester de RC, Melchior J, Maes F, Pouleur AC, Vancraeynest D, Pasquet A, Vanoverschelde JL and Gerber BL. Aortic valve area, stroke volume, left ventricular hypertrophy, remodeling, and fibrosis in aortic stenosis assessed by cardiac magnetic resonance imaging: comparison between high and low gradient and normal and low flow aortic stenosis. *Circ Cardiovasc Imaging*. 2013;6:1009-1017.

13. Barone-Rochette G, Pierard S, De Meester de Ravenstein C, Seldrum S, Melchior J, Maes F, Pouleur AC, Vancraeynest D, Pasquet A, Vanoverschelde JL and Gerber BL. Prognostic significance of LGE by CMR in aortic stenosis patients undergoing valve replacement. *Journal of the American College of Cardiology*. 2014;64:144-54.

14. Musa TA, Treibel TA, Vassiliou VS, Captur G, Singh A, Chin C, Dobson LE, Pica S, Loudon M, Malley T, Rigolli M, Foley JRJ, Bijsterveld P, Law GR, Dweck MR, Myerson SG, McCann GP, Prasad SK, Moon JC and Greenwood JP. Myocardial Scar and Mortality in Severe Aortic Stenosis: Data from the BSCMR Valve Consortium. *Circulation*. 2018.

15. de Meester de Ravenstein C, Bouzin C, Lazam S, Boulif J, Amzulescu M, Melchior J, Pasquet A, Vancraeynest D, Pouleur AC, Vanoverschelde JL and Gerber BL. Histological Validation of measurement of diffuse interstitial myocardial fibrosis by myocardial extravascular volume fraction from Modified Look-Locker imaging (MOLLI) T1 mapping at 3 T. *Journal of cardiovascular magnetic resonance : official journal of the Society for Cardiovascular Magnetic Resonance*. 2015;17:48.

16. Lancellotti P, Moura L, Pierard LA, Agricola E, Popescu BA, Tribouilloy C, Hagendorff A, Monin JL, Badano L and Zamorano JL. European Association of Echocardiography recommendations for the assessment of valvular regurgitation. Part 2: mitral and tricuspid regurgitation (native valve disease). *European journal of echocardiography : the journal of the Working Group on Echocardiography of the European Society of Cardiology*. 2010;11:307-32.

17. Biner S, Rafique A, Rafii F, Tolstrup K, Noorani O, Shiota T, Gurudevan S and Siegel RJ. Reproducibility of proximal isovelocity surface area, vena contracta, and regurgitant jet area for assessment of mitral regurgitation severity. *JACC Cardiovascular imaging*. 2010;3:235-43.

18. Matsumura Y, Fukuda S, Tran H, Greenberg NL, Agler DA, Wada N, Toyono M, Thomas JD and Shiota T. Geometry of the proximal isovelocity surface area in mitral regurgitation by 3-dimensional color Doppler echocardiography: difference between functional mitral regurgitation and prolapse regurgitation. *American heart journal*. 2008;155:231-8.

19. Pu M, Vandervoort PM, Greenberg NL, Powell KA, Griffin BP and Thomas JD. Impact of wall constraint on velocity distribution in proximal flow convergence zone. Implications for color Doppler quantification of mitral regurgitation. *Journal of the American College of Cardiology*. 1996;27:706-13.

20. Moraldo M, Cecaro F, Shun-Shin M, Pabari PA, Davies JE, Xu XY, Hughes AD, Manisty C and Francis DP. Evidence-based recommendations for PISA measurements in mitral regurgitation: systematic review, clinical and in-vitro study. *International journal of cardiology*. 2013;168:1220-8.

21. Uretsky S, Argulian E, Supariwala A, Marcoff L, Koulogiannis K, Aldaia L, Chaudhry FA, Wolff SD and Gillam LD. A Comparative Assessment of Echocardiographic Parameters for Determining Primary Mitral Regurgitation Severity Using Magnetic Resonance Imaging as a Reference Standard. *Journal of the American Society of Echocardiography : official publication of the American Society of Echocardiography*. 2018;31:992-999.

22. Uretsky S, Gillam L, Lang R, Chaudhry FA, Argulian E, Supariwala A, Gurram S, Jain K, Subero M, Jang JJ, Cohen R and Wolff SD. Discordance between echocardiography and MRI in the assessment of mitral regurgitation severity: a prospective multicenter trial. *Journal of the American College of Cardiology*. 2015;65:1078-88.

23. Lopez-Mattei JC, Ibrahim H, Shaikh KA, Little SH, Shah DJ, Maragiannis D and Zoghbi WA. Comparative Assessment of Mitral Regurgitation Severity by Transthoracic Echocardiography and Cardiac Magnetic Resonance Using an Integrative and Quantitative Approach. *The American journal of cardiology*. 2016;117:264-70.

24. Myerson SG, d'Arcy J, Christiansen JP, Dobson LE, Mohiaddin R, Francis JM, Prendergast B, Greenwood JP, Karamitsos TD and Neubauer S. Determination of Clinical Outcome in Mitral Regurgitation With Cardiovascular Magnetic Resonance Quantification. *Circulation*. 2016;133:2287-96.

25. Penicka M, Vecera J, Mirica DC, Kotrc M, Kockova R and Van Camp G. Prognostic Implications of Magnetic Resonance-Derived Quantification in Asymptomatic Patients With Organic Mitral Regurgitation: Comparison With Doppler Echocardiography-Derived Integrative Approach. *Circulation*. 2018;137:1349-1360.

26. Han Y, Peters DC, Salton CJ, Bzymek D, Nezafat R, Goddu B, Kissinger KV, Zimetbaum PJ, Manning WJ and Yeon SB. Cardiovascular magnetic resonance characterization of mitral valve prolapse. *JACC Cardiovascular imaging*. 2008;1:294-303.

27. Seldrum S, de Meester C, Pierard S, Pasquet A, Lazam S, Boulif J, Vanoverschelde JL and Gerber BL. Assessment of Left Ventricular Reverse Remodeling by Cardiac MRI in Patients Undergoing Repair Surgery for Severe Aortic or Mitral Regurgitation. *J Cardiothorac Vasc Anesth*. 2019;33:1901-1911.

28. Chinitz JS, Chen D, Goyal P, Wilson S, Islam F, Nguyen T, Wang Y, Hurtado-Rua S, Simprini L, Cham M, Levine RA, Devereux RB and Weinsaft JW. Mitral apparatus assessment by delayed enhancement CMR: relative impact of infarct distribution on mitral regurgitation. *JACC Cardiovascular imaging*. 2013;6:220-34.

29. Basso C, Perazzolo Marra M, Rizzo S, De Lazzari M, Giorgi B, Cipriani A, Frigo AC, Rigato I, Migliore F, Pilichou K, Bertaglia E, Cacciavillani L, Bauce B, Corrado D, Thiene G and Iliceto S. Arrhythmic Mitral Valve Prolapse and Sudden Cardiac Death. *Circulation*. 2015;132:556-66.

30. Kitkungvan D, Nabi F, Kim RJ, Bonow RO, Khan MA, Xu J, Little SH, Quinones MA, Lawrie GM, Zoghbi WA and Shah DJ. Myocardial Fibrosis in Patients With Primary Mitral Regurgitation With and Without Prolapse. *Journal of the American College of Cardiology*. 2018;72:823-834.

31. Perazzolo Marra M, Basso C, De Lazzari M, Rizzo S, Cipriani A, Giorgi B, Lacognata C, Rigato I, Migliore F, Pilichou K, Cacciavillani L, Bertaglia E, Frigo AC, Bauce B, Corrado D, Thiene G and Iliceto S. Morphofunctional Abnormalities of Mitral Annulus and Arrhythmic Mitral Valve Prolapse. *Circulation Cardiovascular imaging*. 2016;9:e005030.

32. Oosterhof T, van Straten A, Vliegen HW, Meijboom FJ, van Dijk AP, Spijkerboer AM, Bouma BJ, Zwinderman AH, Hazekamp MG, de Roos A and Mulder BJ. Preoperative thresholds for pulmonary valve replacement in patients with corrected tetralogy of Fallot using cardiovascular magnetic resonance. *Circulation*. 2007;116:545-51.

33. Ribeiro HB, Orwat S, Hayek SS, Larose E, Babaliaros V, Dahou A, Le Ven F, Pasian S, Puri R, Abdul-Jawad Altisent O, Campelo-Parada F, Clavel MA, Pibarot P, Lerakis S, Baumgartner H and Rodes-Cabau J. Cardiovascular Magnetic Resonance to Evaluate Aortic Regurgitation After Transcatheter Aortic Valve Replacement. *Journal of the American College of Cardiology*. 2016;68:577-585.

# Figures

Figure 1. Evaluation de la sténose valvulaire a) planimétrie b) équation de continuité

Figure 2. Evaluation de l’insuffisance aortiques par mesure directe par contraste de phase

Figure 3 Evaluation de l’insuffisance mitrale

Figure 4 : Rehaussement tardif dans les sténoses aortiques : a) et b) patterns de fibrose focale, c) et d) amyloidose myocardique

Figure 5 : Evaluation d’une insuffisance mitrale ischémique. Les flèches indiquent la nécrose y compris des muscles papillaires

Figure 6. Angiographie 3 D aortique

Figure 7 : Imagerie en 4D flow des valves.