

## I Revues générales

# La valve aortique : quand l'écho ne suffit pas...

**RÉSUMÉ :** L'échocardiographie est l'outil de première intention pour évaluer la valve aortique. Elle permet de quantifier une régurgitation et de préciser son mécanisme, d'évaluer le degré de sténose aortique ainsi que les conséquences sur le remodelage ventriculaire gauche. Cette technique a cependant des limites en cas de mauvaise échogénéicité, de régurgitations excentrée, non circulaire, multiples et d'importantes calcifications. Les techniques d'imagerie en coupe – imagerie par résonance magnétique (IRM) et tomodensitométrie (TDM) – présentent l'avantage de ne pas être affectées par la fenêtre acoustique, mais nécessitent une synchronisation ECG avec une qualité dégradée en cas d'arythmie et de difficultés à maintenir les apnées. Elles sont recommandées en cas de données cliniques et échographiques discordantes ou de paramètres non concordants en échographie.



**E. VERMES<sup>1</sup>, L. IACUZIO<sup>2</sup>,  
C. TRIBUILLOY<sup>1,3</sup>**

<sup>1</sup> Département de cardiologie, CHU Amiens Picardie, AMIENS.

<sup>2</sup> Département de cardiologie, Centre cardi thoracique de Monaco, MONACO.

<sup>3</sup>UR UPJV 7517, Jules Verne Université de Picardie, AMIENS.

**L'**IRM est la technique la plus fiable dans l'évaluation des volumes, de la fraction d'éjection et de la masse ventriculaire gauche. Elle permet une quantification non invasive précise et reproductible des régurgitations aortiques ainsi que de la fibrose myocardique focale ou diffuse.

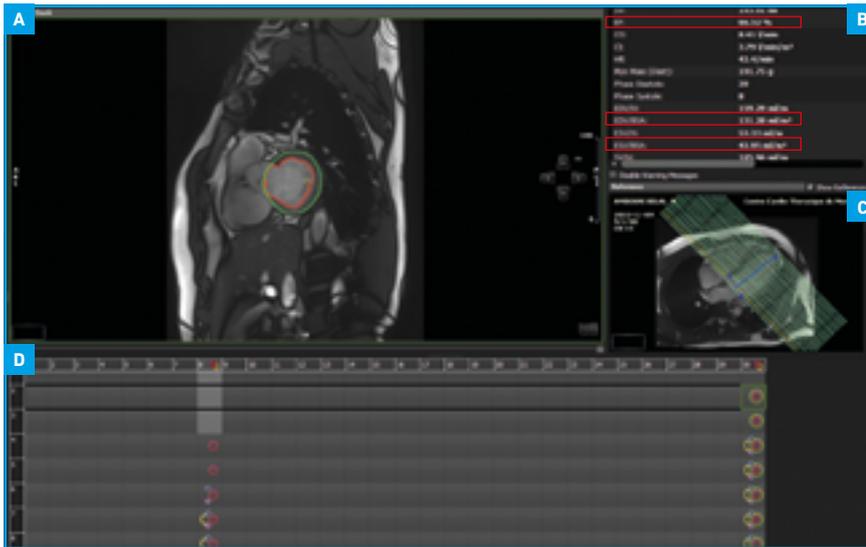
La TDM est la modalité la plus fiable pour mesurer les dimensions de l'aorte, évaluer les calcifications valvulaires (avec entre autres le score valvulaire aortique calcique) et représente un outil indispensable avant l'implantation d'une valve aortique par voie percutanée. Ces techniques en constante évolution (4D flux en IRM, acquisition rapide et peu ionisante en TDM) en font des outils précieux pour le clinicien.

L'échocardiographie est l'examen de première intention pour évaluer une valvulopathie aortique, quantifier la régurgitation et/ou la sténose, préciser l'étiologie et le mécanisme, les conséquences sur le remodelage ventriculaire gauche et les pressions pulmonaires. Cette technique

a néanmoins des limites, par exemple en cas de mauvaise échogénéicité ou de régurgitation multiples. De plus, l'échocardiographie n'est pas le meilleur outil pour étudier les calcifications valvulaires et apprécier leur sévérité.

### ■ Les apports de l'IRM

Quelle que soit la valvulopathie aortique (insuffisance ou régurgitation), l'IRM est la technique de référence pour évaluer le retentissement ventriculaire gauche (VG) : élément important pour orienter les patients asymptomatiques vers une intervention selon les recommandations [1]. Cette technique permet une mesure fiable, reproductible des volumes ventriculaires, de la fraction d'éjection et de la masse VG sans nécessité d'hypothèses géométriques, grâce à des séquences dynamiques ciné SSFP acquises en apnée, en petit axe depuis la valve mitrale jusqu'à l'apex en se positionnant orthogonalement au septum interventriculaire [2]. Un contournage de l'endocarde (par convention en rouge)



**Fig. 1 :** Exemple de mesure des volumes ventriculaires et de la fraction d'éjection du ventricule gauche. Contourage de l'endocarde (rouge) et de l'épicarde (vert) en diastole (A). Paramètres fournis par le logiciel (B) (volume télédiastolique indexé à 131,28 mL/m<sup>2</sup>, volume télésystolique indexé à 43,95 mL/m<sup>2</sup>, fraction d'éjection à 66,5 %). Coupe 4 cavités montrant le positionnement des coupes petit axe de la base du VG vers l'apex perpendiculairement au septum interventriculaire (C). Visualisation des phases acquises, la phase n° 8 définit la systole et la phase n° 30 définit la diastole (D).

et de l'épicarde (par convention en vert) est réalisé sur chaque coupe petit axe en télédiastole et en télésystole (**fig. 1**).

### ● L'apport de l'IRM dans l'insuffisance aortique

Grâce aux séquences dynamiques centrées sur la valve aortique, en 3 cavités, et en coronal oblique, la visualisation de la valve aortique (tri, bi ou quadricuspide) et les mouvements valvulaires sont possibles bien que moins performants que l'échocardiographie ou la TDM, particulièrement dans les prolapsus, assez mal visualisés en IRM. Bien que la précision soit inférieure à celle de la TDM, mais avec l'avantage d'un examen non irradiant, il est possible de mesurer les diamètres de l'aorte lors d'une angio-IRM avec et même récemment sans gadolinium, particulièrement utile en cas d'insuffisance rénale ou de suivi d'une dilatation (**fig. 2**).

La vraie plus-value de l'IRM dans l'insuffisance aortique (IA) réside dans sa capacité à quantifier la régurgitation de façon directe, précise, rapide et fiable

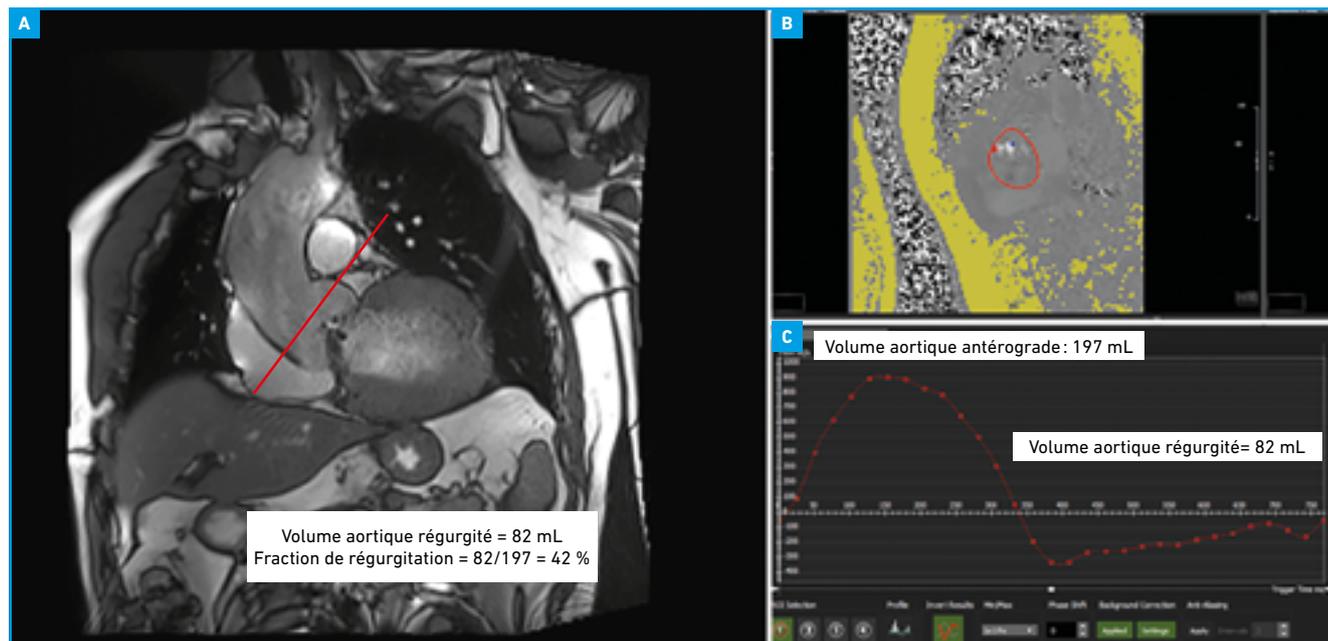
grâce à des séquences en contraste de phase 2D à travers le plan, perpendiculaire à la racine aortique, au-dessus de la valve (typiquement au niveau des sinus de Valsalva ou de la jonction sino tubulaire) [3]. En présence d'une dilatation de l'aorte, en raison des turbulences dans

l'aorte proximale, la mesure est plus fiable au niveau de l'aorte ascendante distale ou au niveau de l'isthme où le flux est linéaire (en l'absence de coarctation). On mesure la vitesse des protons à travers un plan en s'aidant du déphasage de ceux-ci. On obtient des courbes de vitesse en fonction du temps (mL/s) : le volume régurgité (VR) est calculé en faisant l'intégrale sous la courbe du flux diastolique et la fraction de régurgitation (FR) est déduite de la formule (VR/volume antérograde) (**fig. 3**). Cette méthode directe est valide en cas de valvulopathies multiples, ne nécessite qu'une apnée, mais requière des équipes entraînées pour un bon positionnement, une vitesse d'encodage correcte et serait moins fiable en cas de flux complexe (notamment en cas de bicuspidie et de dilatation de l'aorte ascendante) [4]. Les séquences 4D flux (contraste de phase en 3D avec la dimension temps) ont la capacité d'évaluer les flux dans toutes les dimensions de l'espace offrant la possibilité de modifier le positionnement des plans *a posteriori* pour une quantification plus précise quel que soit le type de régurgitation (particulièrement pertinent en cas de flux non laminaire et de jet excentré). Cependant, cette technique nécessite un temps sup-



**Fig. 2 :** Exemple d'une angio-IRM de l'aorte sans (A) et avec (B) injection de produit de contraste.

## Revue générale



**Fig. 3 :** Quantification d'une insuffisance aortique en contraste de phase 2D : positionnement de la coupe (ligne rouge) au niveau des sinus de Valsalva (A) générant une image de phase avec la région d'intérêt contourant l'aorte (B). À partir de la courbe du flux en mL/s à travers la région d'intérêt (C), le volume réurgité aortique représente l'aire sous la courbe du flux diastolique, la fraction de réurgitation est représentée par le volume réurgité/volume antérograde. Dans cet exemple, l'insuffisance aortique est importante avec une fraction de réurgitation à 42 %.

plémentaire d'acquisition et d'analyse, des logiciels de post-traitement coûteux et un apprentissage.

En l'absence de larges études prospectives comparant l'échographie et l'IRM, les seuils de sévérité de l'échographie sont souvent appliqués à l'IRM, avec en faveur d'une IA sévère un VR  $\geq 60$  mL et une FR  $\geq 50$  % [5]. Les données récentes de la littérature plaident pour utiliser une valeur seuil plus basse de fraction de réurgitation de 35 % ou 40 % et de volume réurgité de 45 mL ou 50 mL pour conclure à une IA sévère en IRM [6] [7]. Grâce à des séquences réalisées 10 min après injection d'un produit de contraste extracellulaire gadoliné, l'IRM a la capacité unique de pouvoir évaluer la fibrose myocardique focale en visualisant des prises de contraste (ischémique ou non ischémique) au sein des parois myocardiques VG. Une étude récente a révélé qu'un tiers des patients avec IA avaient des prises de contraste focales sur les séquences de rehaussement tardif, indépendamment

associées à un risque 2,5 fois plus élevé de mortalité [8].

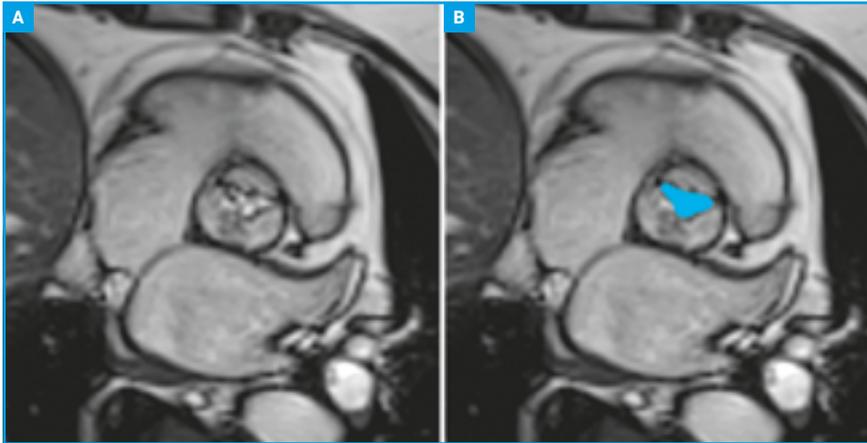
En complément, et plus récemment, l'IRM peut également évaluer la fibrose interstitielle myocardique diffuse, à condition de disposer d'une valeur d'hématocrite récente, grâce à des séquences de cartographie T1 avant et après injection du produit de contraste permettant le calcul du volume extracellulaire (VEC). Encore plus récemment est apparu le VEC indexé (VECi) reflétant la quantité de matrice extracellulaire corrélée à la masse VG. Senapati *et al.* ont récemment démontré que le VECi était mieux corrélé à la sévérité de l'IA et aux événements cardiaque que le VEC ou la fibrose focale [9].

### ● L'apport de l'IRM dans le rétrécissement aortique

Les séquences ciné IRM SSFP acquises en apnée permettent de visualiser la valve aortique. Pour cela, il faut placer un plan perpendiculaire à la racine aor-

tique au niveau de la valve, d'au moins trois coupes contiguës, en s'aidant de deux plans orthogonaux de la chambre de chasse du VG. On peut ainsi évaluer la morphologie de la valve et réaliser une planimétrie directe de la surface aortique bien corrélée à l'ETO [10] (fig. 4). Cependant, cette surface anatomique est légèrement plus élevée que la surface effective (fonctionnelle) mesurée par l'équation de continuité en échocardiographie qui reste la méthode recommandée [11] [1]. En cas de rétrécissement aortique (RA) bas débit, bas gradient, la planimétrie aortique par IRM n'est pas fiable, car ne reflète pas la sévérité du RA de même qu'en cas d'importantes calcifications ou d'orifice non planaire.

Les séquences de contraste de phase (2D ou 4D) décrites dans le chapitre précédent permettent de mesurer la vitesse maximale du flux aortique ainsi que le gradient maximal et moyen aortique. Cependant, en raison d'une résolution temporelle moins bonne que l'échocar-



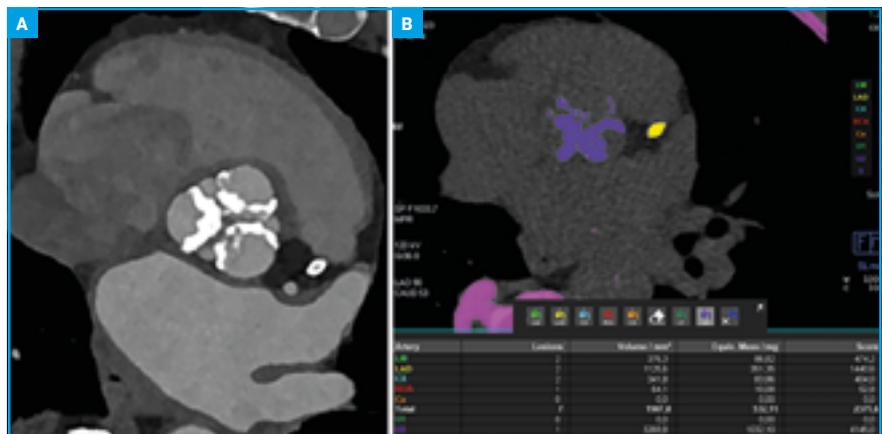
**Fig. 4 :** Exemple de planimétrie de l'orifice aortique en IRM. La valve aortique est tricuspide (A). La surface aortique est mesurée à  $0,7 \text{ cm}^2$  soit  $0,4 \text{ cm}^2/\text{m}^2$  (B).

diographie, une sous-estimation des vitesses et ainsi de la sévérité du RA est quasi systématique.

Le RA génère une augmentation de la postcharge aboutissant à une augmentation de la taille des myocytes, de la masse VG ainsi qu'une expansion de la matrice extracellulaire. Cette dernière peut être la conséquence d'une fibrose focale de remplacement et/ou une fibrose interstitielle réactionnelle. L'intérêt principal de l'IRM dans le RA réside dans sa capacité à quantifier ces deux types de fibrose par les séquences de rehaussement tardif 7 à 10 min après injection d'un produit de contraste et par la réalisation des cartographies T1 pré et post-contraste avec mesure du VEC. La fibrose se développe assez rapidement dans le RA et augmente avec la sévérité avec une valeur pronostique (développement d'une dysfonction VG, arythmie ventriculaire). Plusieurs études observationnelles, ont démontré le rôle pronostic défavorable de la présence de fibrose focale chez les patients en large majorité symptomatiques en post-replacement valvulaire [12] [13] pouvant aller jusqu'à un risque deux fois plus élevé de mortalité [13]. Ces observations ont soulevé l'hypothèse qu'une intervention précoce chez les patients avec RA asymptomatiques et fibrose médiopariétale pourrait améliorer le pronostic de ces patients. L'étude en cours

Evolved-AS incluant spécifiquement des patients asymptomatiques atteints de RA serrés (*early valve replacement guided by biomarkers of LV decompensation in asymptomatic patients with severe aortic stenosis*) devrait confirmer ou non cette hypothèse.

Les études mesurant le VEC avant et après RVA ont montré sur le plan physiopathologique que l'hypertrophie myocardique cellulaire et l'expansion de la matrice extracellulaire (fibrose diffuse) présentes lors d'un RA serré pouvaient régresser avec, en premier lieu, la réduction de l'hypertrophie cellulaire suivie de la réduction de la matrice interstitielle [14, 15].



**Fig. 5 :** Exemple de mesure du score calcique valvulaire aortique. Valve aortique tricuspide très calcifiée (A). Post-traitement pour la mesure du score calcique aortique, les calcifications aortiques apparaissent en violet, le score calcique est à 4 145 signant un rétrécissement aortique serré (B).

Enfin, l'IRM permet de rechercher une cardiopathie associée, soit ischémique (prises de contraste touchant le sous-endocarde), soit amyloïde (prises de contraste diffuses, circonférentielles et un VEC très augmenté) associée au RA dégénératifs dans 9 à 15 % des cas [16].

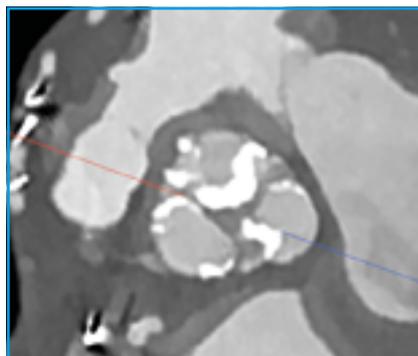
### L'apport de la TDM dans le rétrécissement aortique

Un des avantages de la TDM est la possibilité de mesurer un score calcique valvulaire, indépendant des conditions hémodynamiques, à partir d'une acquisition cardiaque rapide en une apnée, synchronisée à l'ECG sans injection de produit de contraste et peu irradiante ( $< 2 \text{ mSv}$ ). Cette mesure est réalisée à l'aide de logiciels dédiés utilisant la méthode d'Agatston, technique extrapolée de l'estimation du score calcique coronaire [17] (**fig. 5**). Il est nécessaire d'inclure les calcifications des feuillets valvulaires et de l'anneau aortique en excluant celles de la chambre de chasse du VG et de l'anneau mitral. Ce score est corrélé à la sévérité du RA calcifié, mais peut être en défaut en cas de RA fibreux ou peu calcifié, serré en particulier chez les patients plus jeunes et atteints de bicuspidies. Les valeurs seuils (exprimées en unités d'Agatston : UA) pour

## Revue générale

définir la sévérité du RA sont différentes chez les hommes et chez les femmes qui ont tendance à moins calcifier la valve aortique (**tableau I**). Le score calcique est particulièrement utile au clinicien notamment en cas de RA bas débit et quand l'échocardiographie n'est pas concluante [18]. Cependant, il existe des zones grises situées entre 1 600 et 1 999 chez l'homme et entre 800 et 1 199 chez la femme ne permettant pas toujours de conclure. Le score calcique a aussi une valeur pronostique pour prédire la vitesse de progression du RA, la nécessité de chirurgie ou la mortalité, indépendamment des données cliniques et échocardiographiques [19].

Grâce aux acquisitions avec synchronisations ECG rétrospectives sur l'ensemble du cycle cardiaque et après injection de produit de contraste iodé, la TDM est complémentaire de l'échocardiographie pour évaluer la morphologie de la valve aortique (bicuspidie ou tricuspide), la présence d'images d'addition tels que végétations ou abcès. Il est ainsi plus performant que l'ETO pour le diagnostic d'abcès de l'anneau lors des endocardites infectieuses [20]. C'est l'examen de référence pour évaluer l'extension des calcifications valvulaires et leur répartition (**fig. 6**). Comme en IRM, une planimétrie de l'orifice aortique est possible, mais la surface obtenue est une surface anatomique, plus importante que la surface fonctionnelle calculée par équation de continuité en échocardiographie [21]. Il est désormais possible, bien que non rentré dans les protocoles de routine, de quantifier le volume extracellulaire et le rehaussement tardif grâce à des scanners



**Fig. 6 :** Illustration d'une valve aortique tricuspide avec nombreuses calcifications valvulaires bien visibles avec la TDM.

doubles sources, une acquisition tardive et un logiciel dédié [22].

En raison de son excellente résolution spatiale comparée aux autres modalités, La TDM est la modalité de référence pour la mesure précise des dimensions

## POINTS FORTS

- L'IRM et la TDM sont des modalités complémentaires à l'échocardiographie dans l'évaluation quantitative d'une valvulopathie aortique, notamment en cas d'échocardiographie douteuse ou en discordance avec les données cliniques.
- L'IRM permet de visualiser la morphologie de la valve, de réaliser une évaluation fiable de la sévérité de la régurgitation aortique par le calcul de la fraction de régurgitation, de préciser le retentissement ventriculaire gauche et d'évaluer de façon non invasive la fibrose myocardique focale et/ou diffuse.
- La TDM permet de calculer un score calcique valvulaire bien corrélé à la sévérité du rétrécissement aortique calcifié, d'effectuer une analyse précise de l'aorte et de fournir des informations anatomiques indispensables avant l'implantation d'une valve aortique per cutanée.

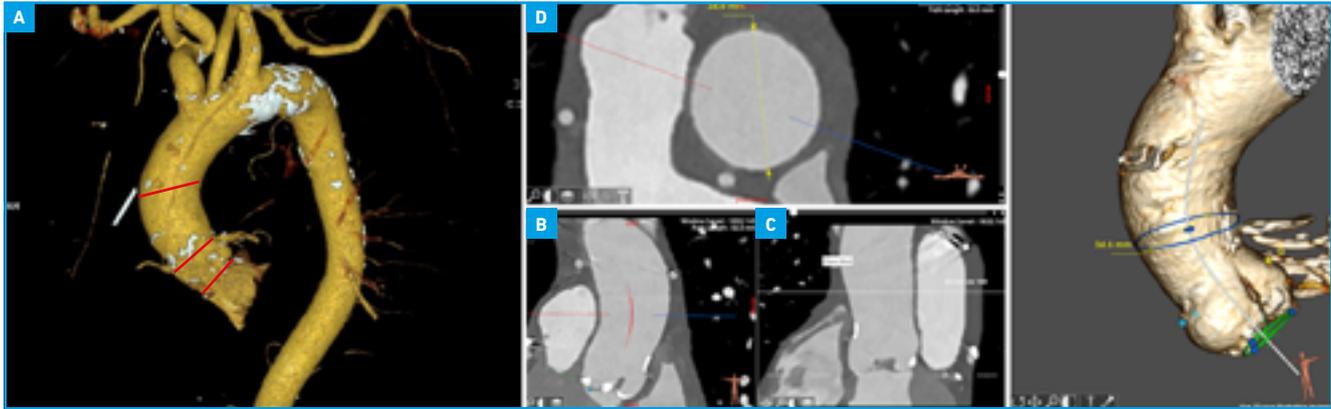
de l'aorte toujours effectuée orthogonalement au grand axe de l'aorte. Les diamètres maximaux aortiques sont mesurés au niveau de l'anneau aortique, des sinus de Valsalva, de la jonction sinotubulaire et de la portion tubulaire de l'aorte ascendante (**fig. 7**). Alors que la TDM et l'IRM sont concordants dans la mesure de la racine aortique, l'échocardiographie transthoracique a tendance à sous-estimer cette mesure [23]. En effet, la racine aortique n'étant pas symétrique (notamment en cas de bicuspidie), une mesure dans un seul plan tend à sous-estimer la taille réelle de la valve aortique.

La TDM est un examen indispensable avant l'implantation d'une valve par voie percutanée. Outre les mesures aortiques, il permet l'analyse des axes iliofémoraux, les calcifications et leurs tortuosités, ainsi que la visualisation des coronaires et leur hauteur, et guide l'opérateur pour définir les meilleures incidences d'implantation.

Les limites de la TDM sont représentées par la néphrotoxicité du produit de contraste iodé et l'exposition RX induite, cependant réduite ces dernières années avec les avancées technologiques (modu-

Sévérité du RA	Hommes	Femmes
Très Probablement serré	≥ 3 000UA	≥ 1 600UA
Probablement serré	≥ 2 000UA	≥ 1 200 UA
Probablement non serré	< 1 600UA	< 800UA

**Tableau I :** Valeurs seuils de score calcique valvulaire aortique définissant sa sévérité, chez l'homme et chez la femme.



**Fig. 7 :** Aorte en angio-TDM au temps artériel avec reconstruction tridimensionnelle de type rendu volumique (A). Les lignes rouges représentent les différents niveaux de mesure. Illustration de la mesure de l'aorte ascendante avec la technique de la double obliquité. Deux plans orthogonaux entre eux (B et C) permettent la mesure (D).

lation des milliampères et la réduction des kilovolts).

### ● L'apport de la TDM dans l'insuffisance aortique

Comme dans le RA, la TDM est l'examen de référence pour la mesure des dimensions de l'aorte. Il est indispensable quand on envisage un geste aortique associé à la chirurgie valvulaire ou quand on a des doutes sur les mesures échocardiographiques.

Elle est aussi proposée comme alternative à la coronarographie pour éliminer une atteinte coronaire chez les patients à faible risque CV [24]. En présence d'une endocardite avec suspicions d'abcès, elle permet un bilan des lésions et leurs rapports anatomiques avant une chirurgie à risque [25].

### BIBLIOGRAPHIE

1. VAHANIAN A, BEYERSDORF F, PRAZ F *et al.* 2021 ESC/EACTS Guidelines for the management of valvular heart disease. *Eur Heart J*, 2022;43:561-632.
2. KRAMER CM, BARKHAUSEN J, BUCCIARELLI-DUCCI C *et al.* Standardized cardiovascular magnetic resonance imaging (CMR) protocols: 2020 update. *J Cardiovasc Magn Reson*, 2020;22:17.
3. VERMES E, IACUZIO L, LEVY F *et al.* Role of cardiovascular magnetic resonance in native valvular regurgitation: a comprehensive review of protocols, grading of severity, and prediction of valve surgery. *Front Cardiovasc Med*, 2022;9:881141.
4. TRUEDSSON F, POLTE CL, GAO SA *et al.* Importance of complex blood flow in the assessment of aortic regurgitation severity using phase contrast magnetic resonance imaging. *Int J Cardiovasc Imaging*, 2021;37:3561-3572.
5. LANCELLOTTI P, PIBAROT P, CHAMBERS J *et al.* Multi-modality imaging assessment of native valvular regurgitation: an EACVI and ESC council of valvular heart disease position paper. *Eur Heart J Cardiovasc Imaging*, 2022;23:e171-232.
6. MALAHFJI M, CRUDO V, KAOLAWANICH Y *et al.* Influence of cardiac remodeling on clinical outcomes in patients with aortic regurgitation. *J Am Coll Cardiol*, 2023;81:1885-1898.
7. MYERSON SG, D'ARCY J, MOHIADDIN R *et al.* Aortic regurgitation quantification using cardiovascular magnetic resonance: association with clinical outcome. *Circulation*, 2012;126:1452-1460.
8. MALAHFJI M, SENAPATI A, TAYAL B *et al.* Myocardial scar and mortality in chronic aortic regurgitation. *J Am Heart Assoc*, 2020;9:e018731.
9. SENAPATI A, MALAHFJI M, DEBS D *et al.* Regional replacement and diffuse interstitial fibrosis in aortic regurgitation: prognostic implications from cardiac magnetic resonance. *JACC Cardiovasc Imaging*, 2021;14:2170-2182.
10. JOHN AS, DILL T, BRANDT RR *et al.* Magnetic resonance to assess the aortic valve area in aortic stenosis: how does it compare to current diagnostic standards? *J Am Coll Cardiol*, 2003;42:519-526.
11. LEVY F, IACUZIO L, CIVAIA F *et al.* Usefulness of 3-Tesla cardiac magnetic resonance imaging in the assessment of aortic stenosis severity in routine clinical practice. *Arch Cardiovasc Dis*, 2016;109:618-625.
12. BARONE-ROCHETTE G, PIÉRARD S, DE MEESTER DE RAVENSTEIN C *et al.* Prognostic significance of LGE by CMR in aortic stenosis patients undergoing valve replacement. *J Am Coll Cardiol*, 2014;64:144-154.
13. MUSA TA, TREIBEL TA, VASSILIOU VS *et al.* Myocardial scar and mortality in severe aortic stenosis. *Circulation*, 2018;138:1935-1947.
14. TREIBEL TA, KOZOR R, SCHOFIELD R *et al.* Reverse myocardial remodeling following valve replacement in patients with aortic stenosis. *J Am Coll Cardiol*, 2018;71:860-871.
15. VERMES E, CAZENEUVE N, BOHBOT Y *et al.* Intracellular and extracellular myocardial changes after aortic valve replacement for severe aortic stenosis: A prospective pilot cardiovascular magnetic resonance study in patients with isolated interstitial diffuse myocardial fibrosis. *Arch Cardiovasc Dis*, 2022; 115:538-540.
16. NITSCHKE C, SCULLY PR, PATEL KP *et al.* Prevalence and outcomes of concomitant aortic stenosis and cardiac amyloidosis. *J Am Coll Cardiol*, 2021;77:128-139. <https://doi.org/10.1016/j.jacc.2020.11.006>.
17. MESSIKA-ZEITOUN D, AUBRY M-C, DETAINT D *et al.* Evaluation and clinical implications of aortic valve calcification measured by electron-beam computed tomography. *Circulation*, 2004;110:356-362.

## I Revues générales

18. BAUMGARTNER H, FALK V, BAX JJ *et al.* 2017 ESC/EACTS Guidelines for the management of valvular heart disease. *Eur Heart J*, 2017;38:2739-2791.
19. TASTET L, ENRIQUEZ-SARANO M, CAPOULADE R *et al.* Impact of aortic valve calcification and sex on hemodynamic progression and clinical outcomes in AS. *J Am Coll Cardiol*, 2017;69:2096-2098.
20. DELGADO V, AJMONE MARSAN N, DE WAHA S *et al.* 2023 ESC Guidelines for the management of endocarditis. *Eur Heart J*, 2023;44:3948-4042.
21. TOPS LF, WOOD DA, DELGADO V *et al.* Noninvasive evaluation of the aortic root with multislice computed tomography implications for transcatheter aortic valve replacement. *JACC Cardiovasc Imaging*, 2008;1:321-330.
22. CUNDARI G, GALEA N, MERGEN V *et al.* Myocardial extracellular volume quantification with computed tomography-current status and future outlook. *Insights Imaging*, 2023;14:156.
23. FRAZAO C, TAVOOSI A, WINTERSPERGER BJ *et al.* Multimodality assessment of thoracic aortic dimensions: comparison of computed tomography angiography, magnetic resonance imaging, and echocardiography measurements. *J Thorac Imaging*, 2020;35:399-406.
24. GOHMANN RF, SEITZ P, PAWELKA K *et al.* Combined coronary CT-angiography and TAVI planning: utility of CT-FFR in patients with morphologically ruled-out obstructive coronary artery disease. *J Clin Med*, 2022;11:1331.
25. UGOLINI P, MOUSSEAU E, HERNIGOU A *et al.* Infectious pseudoaneurysms suspected at echocardiography: electron-beam CT findings. *Radiology*, 2000;217:263-269.

---

Les auteurs ont déclaré ne pas avoir de liens d'intérêts concernant les données publiées dans cet article.