

Université de Poitiers
Faculté de Médecine et Pharmacie

ANNEE 2015

Thèse n°

THESE
POUR LE DIPLOME D'ETAT
DE DOCTEUR EN MEDECINE
(décret du 16 janvier 2004)

présentée et soutenue publiquement
le 10 Septembre 2015 à Poitiers
par **Olivier Guillard**

Echographie en trois dimensions par reconstruction comparée à l'imagerie par résonance magnétique pour la mesure des volumes et de la fonction du ventricule droit dans les cardiopathies congénitales avec surcharge du ventricule droit.

COMPOSITION DU JURY

Président : Monsieur le Professeur Damien BONNET

Membres :

- Monsieur le Professeur Jean-Benoît THAMBO
- Monsieur le Professeur Luc CHRISTIAENS
- Monsieur le Docteur Alaeddin NASSIMI

Directeur de thèse : Pr Damien BONNET

Université de Poitiers

Faculté de Médecine et Pharmacie

ANNEE 2015

Thèse n°

THESE

**POUR LE DIPLOME D'ETAT
DE DOCTEUR EN MEDECINE
(décret du 16 janvier 2004)**

présentée et soutenue publiquement
le 10 Septembre 2015 à Poitiers
par **Olivier Guillard**

Echographie en trois dimensions par reconstruction comparée à l'imagerie par résonance magnétique pour la mesure des volumes et de la fonction du ventricule droit dans les cardiopathies congénitales avec surcharge du ventricule droit.

COMPOSITION DU JURY

Président : Monsieur le Professeur Damien BONNET

Membres :

- Monsieur le Professeur Jean-Benoît THAMBO
- Monsieur le Professeur Luc CHRISTIAENS
- Monsieur le Docteur Alaeddin NASSIMI

Directeur de thèse : Pr Damien BONNET



UNIVERSITE DE POITIERS

Faculté de Médecine et de Pharmacie



Le Doyen,

Année universitaire 2014 - 2015

LISTE DES ENSEIGNANTS DE MEDECINE

Professeurs des Universités-Praticiens Hospitaliers

1. AGIUS Gérard, bactériologie-virologie
2. ALLAL Joseph, thérapeutique
3. BATAILLE Benoît, neurochirurgie
4. BRIDOUX Frank, néphrologie
5. BURUCOA Christophe, bactériologie - virologie
6. CARRETIER Michel, chirurgie générale
7. CHEZE-LE REST Catherine, biophysique et médecine nucléaire
8. CHRISTIAENS Luc, cardiologie
9. CORBI Pierre, chirurgie thoracique et cardio-vasculaire
10. DEBAENE Bertrand, anesthésiologie réanimation
11. DEBIAIS Françoise, rhumatologie
12. DROUOT Xavier, physiologie
13. DUFOUR Xavier, Oto-Rhino-Laryngologie
14. EUGENE Michel, physiologie (**surnombre jusqu'en 08/2016**)
15. FAURE Jean-Pierre, anatomie
16. FRITEL Xavier, gynécologie-obstétrique
17. GAYET Louis-Etienne, chirurgie orthopédique et traumatologique
18. GICQUEL Ludovic, pédopsychiatrie
19. GILBERT Brigitte, génétique
20. GOMBERT Jean-Marc, immunologie
21. GOUJON Jean-Michel, anatomie et cytologie pathologiques
22. GUILHOT-GAUDEFFROY François, hématologie et transfusion
23. GUILLET Gérard, dermatologie
24. GUILLEVIN Rémy, radiologie et imagerie médicale
25. HADJADJ Samy, endocrinologie et maladies métaboliques
26. HAUET Thierry, biochimie et biologie moléculaire
27. HERPIN Daniel, cardiologie
28. HOUETO Jean-Luc, neurologie
29. INGRAND Pierre, biostatistiques, informatique médicale
30. IRANI Jacques, urologie
31. JABER Mohamed, cytologie et histologie
32. JAAFARI Nematollah, psychiatrie d'adultes
33. JAYLE Christophe, chirurgie thoracique t cardio-vasculaire
34. KARAYAN-TAPON Lucie, oncérologie
35. KEMOUN Gilles, médecine physique et réadaptation
(**en détachement 2 ans à compter de janvier 2014**)
36. KITZIS Alain, biologie cellulaire
37. KRAIMPS Jean-Louis, chirurgie générale
38. LECRON Jean-Claude, biochimie et biologie moléculaire
39. LEVARD Guillaume, chirurgie infantile
40. LEVEZIEL Nicolas, ophtalmologie
41. LEVILLAIN Pierre, anatomie et cytologie pathologiques
42. MACCHI Laurent, hématologie
43. MARECHAUD Richard, médecine interne
44. MAUCO Gérard, biochimie et biologie moléculaire
45. MEURICE Jean-Claude, pneumologie
46. MIGEOT Virginie, santé publique
47. MILLOT Frédéric, pédiatrie, oncologie pédiatrique
48. MIMOZ Olivier, anesthésiologie - réanimation
49. MORICHAU-BEAUCHANT Michel, hépato-gastro-entérologie
50. NEAU Jean-Philippe, neurologie
51. ORIOT Denis, pédiatrie
52. PACCALIN Marc, gériatrie
53. PAQUEREAU Joël, physiologie
54. PERAULT Marie-Christine, pharmacologie clinique
55. PERDRISOT Rémy, biophysique et médecine nucléaire
56. PIERRE Fabrice, gynécologie et obstétrique
57. POURRAT Olivier, médecine interne
58. PRIES Pierre, chirurgie orthopédique et traumatologique
59. RICCO Jean-Baptiste, chirurgie vasculaire
60. RICHER Jean-Pierre, anatomie
61. RIGOARD Philippe, neurochirurgie
62. ROBERT René, réanimation
63. ROBLLOT France, maladies infectieuses, maladies tropicales
64. ROBLLOT Pascal, médecine interne
65. RODIER Marie-Hélène, parasitologie et mycologie
66. SENON Jean-Louis, psychiatrie d'adultes (**surnombre jusqu'en 08/2017**)
67. SILVAIN Christine, hépato-gastro- entérologie
68. SOLAU-GERVAIS Elisabeth, rhumatologie
69. TASU Jean-Pierre, radiologie et imagerie médicale
70. TOUCHARD Guy, néphrologie
71. TOURANI Jean-Marc, oncérologie
72. WAGER Michel, neurochirurgie

Maîtres de Conférences des Universités-Praticiens Hospitaliers

1. ALBOUY-LLATY Marion, santé publique
2. ARIES Jacques, anesthésiologie - réanimation
3. BEBY-DEFAUX Agnès, bactériologie - virologie
4. BEN-BRIK Eric, médecine du travail
5. BILAN Frédéric, génétique
6. BOURMEYSTER Nicolas, biologie cellulaire
7. CASTEL Olivier, bactériologie - virologie - hygiène
8. CATEAU Estelle, parasitologie et mycologie
9. CREMNITER Julie, bactériologie - virologie
10. DAHYOT-FIZELIER Claire, anesthésiologie - réanimation
11. DIAZ Véronique, physiologie
12. FAVREAU Frédéric, biochimie et biologie moléculaire
13. FRASCA Denis, anesthésiologie - réanimation
14. HURET Jean-Loup, génétique
15. LAFAY Claire, pharmacologie clinique
16. SAPANET Michel, médecine légale
17. SCHNEIDER Fabrice, chirurgie vasculaire
18. THILLE Arnaud, réanimation
19. TOUGERON David, hépato-gastro-entérologie

Professeur des universités de médecine générale

GOMES DA CUNHA José

Professeurs associés de médecine générale

BINDER Philippe
VALETTE Thierry

Maîtres de Conférences associés de médecine générale

BIRAULT François
BOUSSAGEON Rémy
FRECHE Bernard
GIRARDEAU Stéphane
GRANDCOLIN Stéphanie
PARTHENAY Pascal
VICTOR-CHAPLET Valérie

Enseignants d'Anglais

DEBAIL Didier, professeur certifié
PERKINS Marguerite, maître de langue étrangère
SASU Elena, enseignant contractuel

Professeurs émérites

1. DORE Bertrand, urologie (08/2016)
2. FAUCHERE Jean-Louis, bactériologie – virologie (08/2015)
3. GIL Roger, neurologie (08/2017)
4. MAGNIN Guillaume, gynécologie-obstétrique (08/2016)
5. MARCELLI Daniel, pédopsychiatrie (08/2017)
6. MENU Paul, chirurgie thoracique et cardio-vasculaire (08/2017)

Professeurs et Maîtres de Conférences honoraires

1. ALCALAY Michel, rhumatologie
2. BABIN Michèle, anatomie et cytologie pathologiques
3. BABIN Philippe, anatomie et cytologie pathologiques
4. BARBIER Jacques, chirurgie générale (ex-émérite)
5. BARRIERE Michel, biochimie et biologie moléculaire
6. BECQ-GIRAUDON Bertrand, maladies infectieuses, maladies tropicales (ex-émérite)
7. BEGON François, biophysique, Médecine nucléaire
8. BOINOT Catherine, hématologie - transfusion
9. BOUTOUX Daniel, rhumatologie (ex-émérite)
10. BURIN Pierre, histologie
11. CASTETS Monique, bactériologie -virologie – hygiène
12. CAVELLIER Jean-François, biophysique et médecine nucléaire
13. CHANSIGAUD Jean-Pierre, biologie du développement et de la reproduction
14. CLARAC Jean-Pierre, chirurgie orthopédique
15. DABAN Alain, cancérologie radiothérapie (ex-émérite)
16. DAGREGORIO Guy, chirurgie plastique et reconstructrice
17. DESMAREST Marie-Cécile, hématologie
18. DEMANGE Jean, cardiologie et maladies vasculaires
19. FONTANEL Jean-Pierre, Oto-Rhino Laryngologie (ex-émérite)
20. GOMBERT Jacques, biochimie
21. GRIGNON Bernadette, bactériologie
22. GUILLARD Olivier, biochimie et biologie moléculaire
23. JACQUEMIN Jean-Louis, parasitologie et mycologie médicale
24. KAMINA Pierre, anatomie (ex-émérite)
25. KLOSSEK Jean-Michel, Oto-Rhino-Laryngologie
26. LAPIERRE Françoise, neurochirurgie (ex-émérite)
27. LARSEN Christian-Jacques, biochimie et biologie moléculaire
28. MAIN de BOISSIERE Alain, pédiatrie
29. MARILLAUD Albert, physiologie
30. MORIN Michel, radiologie, imagerie médicale
31. POINTREAU Philippe, biochimie
32. REISS Daniel, biochimie
33. RIDEAU Yves, anatomie
34. SULTAN Yvette, hématologie et transfusion
35. TALLINEAU Claude, biochimie et biologie moléculaire
36. TANZER Joseph, hématologie et transfusion (ex-émérite)
37. VANDERMARCO Guy, radiologie et imagerie médicale

REMERCIEMENTS

A mon directeur de thèse, Monsieur le Professeur Damien Bonnet, veuillez trouver ici le témoignage de ma vive reconnaissance et de mon profond respect.

A Messieurs les membres du jury,
Monsieur le Professeur Luc Christiaens
Monsieur le Professeur Jean-Benoît Thambo
Monsieur le Docteur Alaeddin Nassimi.

A Madame le Docteur Diala Khraiche pour m'avoir accueilli, guidé, aidé avec sérénité, disponibilité, patience, pédagogie et gentillesse depuis mon premier jour à Necker.

A toute l'équipe médicale, paramédicale et administrative de l'Unité Médico-Chirurgicale de Cardiologie Pédiatrique du Centre Hospitalier Universitaire Necker - Enfants malades. Merci à toutes et à tous de m'avoir chaleureusement accueilli.

A l'Association pour la Recherche en Cardiologie du Fœtus à l'Adulte.

A Madame le Docteur Amina Asadi pour sa relecture et à Madame Amina Guillard-Asadi.

A ma famille et ma belle-famille.

A tous ceux de Tours, de Poitiers et de Paris qui m'ont accompagné, soutenu et supporté tout au long de ce voyage au bout de la nuit pictavienne : Antoine, Winny, Arnaud, Olivia, Pauline, Elodie, Hélène, Ivan, Marie-Laure, François, Marie, Amélie, Floriane, Lamia, Maia, Mathilde, Nabil, Myriam, Meryem, Noémie, Anaïs, Charles, Clarisse, Lucile, Elham, Carla, François, Louis-Marie, mes plus vaillants externes...

A Messieurs les Docteurs Philippe Pouard et Jérôme Petit pour leur confiance.

A l'année universitaire 2012-2013 qui m'a redonné espoir.

SOMMAIRE

INTRODUCTION	3
MATERIEL ET METHODES	5
Design de l'étude	5
Acquisition des images échocardiographiques	5
Analyse post-acquisition des images échographiques	6
Acquisition et analyse des images IRM	6
Analyses statistiques	7
RESULTATS	8
Population de l'étude	8
Reproductibilité	8
Pertinence	8
DISCUSSION	10
Faisabilité	10
Reproductibilité	11
Pertinence	11
Limites	13
CONCLUSION	15
BIBLIOGRAPHIE	16
ANNEXE 1 : TABLEAUX	21
ANNEXE 2 : FIGURES	24
RESUME	28

INTRODUCTION

Dans les cardiopathies congénitales et pédiatriques, les surcharges de pression ou de volume du ventricule droit sont fréquentes¹. Dans un premier temps, le remodelage du ventricule droit lui permet de s'adapter aux contraintes subies²⁻⁵; mais à plus long terme, la dilatation et l'hypertrophie sont à l'origine d'une dysfonction du ventricule droit et de troubles du rythme qui marquent significativement le pronostic et la qualité de vie des patients⁶⁻⁹. La surveillance du volume et de la fonction du ventricule droit est alors essentielle afin de déterminer le meilleur timing pour une modification thérapeutique, qu'il s'agisse d'un traitement médicamenteux ou d'une intervention permettant d'atténuer la surcharge du ventricule droit. Par exemple, après cure complète chirurgicale d'une tétralogie de Fallot, la surcharge de volume du ventricule droit par la fuite pulmonaire peut nécessiter une revalvulation pulmonaire par voie endovasculaire ou chirurgicale. Le timing de cette revalvulation est déterminé par la symptomatologie, la fonction et les volumes indexés du ventricule droit^{6,10-14}.

L'imagerie par résonnance magnétique (IRM) est le gold-standard pour l'étude du ventricule droit^{6,15,16}. C'est un examen non irradiant indépendant de la géométrie avec une bonne reproductibilité, y compris chez les patients avec cardiopathies congénitales dilatant le ventricule droit¹⁷⁻¹⁹. Cependant, c'est une technique coûteuse, consommatrice de temps (le protocole complet chez un patient coopérant dure 70 minutes)¹¹, avec certaines contre-indications. De plus, une sédation voire une anesthésie générale est souvent nécessaire dans la population pédiatrique. L'échographie transthoracique est le principal outil pour le suivi des patients de cardiologie. Son utilisation est simple et rapide mais la forme géométrique complexe et la position antérieure du ventricule droit ne permettent pas une bonne estimation de ses volumes et de sa fonction par échographie en deux dimensions (2D)²⁰⁻²⁴. L'échographie en trois dimensions (3D) en temps réel pourrait être une bonne alternative²⁵⁻²⁷ ; cependant elle a tendance à sous-estimer les volumes (jusqu'à 25%), et ce d'autant plus que le ventricule droit est dilaté^{28,29}. De plus, la nécessité de contourer le myocarde chez des patients avec antécédents de chirurgie cardiaque souvent peu échogènes et de garder l'apnée sur trois cycles cardiaques consécutifs confèrent à cet examen une faisabilité de 20 à 80% dans cette population^{30,31}.

L'échographie en trois dimensions basée sur la reconnaissance (3DKR) est une nouvelle technique permettant de reconstruire des volumes à partir d'images échographiques en deux dimensions à l'aide d'un équipement spécial. Après avoir annoté des repères anatomiques clés sur des incidences standard, la modélisation des volumes est permise en interrogeant une base d'examens IRM de ventricules droits de formes et dimensions variées. Cette technique est validée pour l'étude du ventricule gauche depuis 2003³² et pour celle du ventricule droit depuis 2010³³ chez des patients adultes.

Le but de notre étude était d'évaluer la faisabilité, la reproductibilité et la pertinence de la technique 3DKR chez des enfants avec cardiopathies congénitales selon les différents types de surcharge du ventricule droit.

MATERIEL ET METHODES

Design de l'étude

Il s'agit d'une étude observationnelle monocentrique prospective. Nous avons recruté tous les patients consécutifs âgés de 0 à 18 ans avec cardiopathie congénitale atteignant le ventricule droit, convoqués pour IRM cardiaque lors d'une indication clinique. Le même jour, chacun a bénéficié d'une échocardiographie transthoracique avec acquisition des images nécessaires à la reconstruction 3D des volumes du ventricule droit. Les critères d'exclusion étaient les arythmies interférant avec l'acquisition des images, les pacemakers et autres contre-indications à la réalisation d'une IRM cardiaque. Les patients n'ont pas été pré-sélectionnés par rapport à la qualité des images à l'échocardiographie 2D avant l'inclusion ou leur compliance aux examens.

Cette étude a été approuvée par le comité d'éthique de notre institution. Un consentement libre et éclairé était obtenu de la part de tous les participants et/ou leur représentant légal.

Acquisition des images échocardiographiques

Les images échocardiographiques ont été acquises à l'aide d'un échographe Vivid E9 (GE Healthcare, Milwaukee, WI). Celui-ci était connecté à un ordinateur spécialisé (Ventripoint Diagnostics Ltd., Seattle, WA) associé à une sonde et à un générateur de champ magnétique capables de localiser la position et l'orientation de la sonde ultrasonore dans l'espace (Ascension Technology Corporation, Andover, MA) (Figure 1).

Pour obtenir la meilleure couverture du ventricule droit, une dizaine d'incidences échographiques étaient acquises chez chaque patient. Elles sont détaillées dans le Tableau 1 et illustrées Figure 2. Chaque incidence était enregistrée sur 3 cycles cardiaques. L'apnée n'était pas demandée. Les patients devaient rester dans la même position sur la table d'examen pendant toute la durée du processus d'acquisition. Celle-ci était systématiquement inférieure à 5 minutes. Un enregistrement électrocardiographique était systématiquement associé à l'acquisition échocardiographique. Les images étaient enregistrées et analysées secondairement.

Analyse échographique post-acquisition

La méthode 3DKR permet de reconstruire la forme de l'endocarde du ventricule droit à partir de repères anatomiques clés. Sur les différentes incidences du ventricule droit, en télédiastole et en télésystole, nous avons placé des points correspondant à des repères anatomiques spécifiques : les anneaux valvulaires tricuspide et pulmonaire, le septum conal, la face ventriculaire droite du septum interventriculaire, l'apex du ventricule droit, la paroi libre du ventricule droit, la paroi inférieure du ventricule droit et l'infundibulum pulmonaire. Un minimum de 18 points était nécessaire pour la reconstruction des volumes du ventricule droit. Il n'était pas nécessaire de tracer les bordures du myocarde. La télédiastole était repérée comme le début de l'onde R électrocardiographique et la télésystole comme la fin de l'onde T électrocardiographique. Le poids et la taille étaient renseignés.

Les coordonnées spatiales sont ensuite envoyées par connexion internet sécurisée à un serveur délocalisé qui calcule les volumes du ventricule droit à l'aide d'un algorithme mathématique créé à partir d'une base de données d'images IRM de nombreux ventricules droits et du logiciel *Piecewise Smooth Subdivision Surface* de l'Université de Washington³². Les études des patients avec des cardiopathies conotruncales réparées (tétralogie de Fallot, tronc artériel commun, atrésie pulmonaire) étaient reconstruites avec un catalogue d'images de ventricules droits de patients atteints de tétralogie de Fallot qui avaient bénéficié de différentes procédures chirurgicales, avec des fuites pulmonaires et tricuspides de sévérité variable et une dilatation variable de la voie d'éjection ; les études des patients avec syndrome d'hypoplasie du cœur gauche étaient reconstruites à l'aide d'un catalogue d'hypertension artérielle pulmonaire. Les volumes télédiastoliques, télésystoliques et la fraction d'éjection du ventricule droit étaient calculés.

Un unique observateur a analysé l'ensemble des échocardiographies en aveugle des résultats de l'IRM. La variabilité intra-observateur était évaluée sur un échantillon de 20 échographies choisies au hasard en répétant la méthode 3DKR à 2 reprises avec un intervalle d'au moins 15 jours entre les analyses. La variabilité inter-observateurs était évaluée sur un échantillon de 20 échographies choisies au hasard par 2 opérateurs en aveugle.

Acquisition et analyse des images IRM

Les images IRM étaient obtenues par un scanner 1,5T (GE Healthcare, Milwaukee, WI). La séquence ciné-IRM en sang blanc (acquisition en écho de gradient 2D dite *Steady-State Free Precession*), idéalement réalisée en apnée, était utilisée pour le calcul des volumes du ventricule droit et de la fraction d'éjection en utilisant la méthode de sommation des disques de Simpson à partir de coupes petit axe parallèles au plan de la valve tricuspide. Comme utilisé dans la méthode 3DKR, les trabéculations et les muscles papillaires étaient inclus dans les volumes ventriculaires. Le volume télédiastolique était défini comme le volume maximal et le volume télésystolique comme le volume minimal du ventricule droit au cours du cycle. Un observateur unique a analysé l'ensemble des images IRM en aveugle des résultats de l'échocardiographie.

Analyses statistiques

Différentes méthodes statistiques ont été utilisées pour étudier les variabilités intra-observateur, inter-observateur et inter-technique. L'agrément entre les deux techniques de mesures est décrit en utilisant des diagrammes de Bland-Altman, incluant le calcul du biais moyen (différence moyenne entre les deux mesures) et des déviations standards. La significativité statistique du biais moyen était testée en utilisant un t-test apparié. Le pourcentage de variabilité (différence entre les paires de mesures divisée par la moyenne de la totalité des mesures et multipliée par 100) et le pourcentage de biais étaient calculés pour les différentes analyses de Bland-Altman. Les corrélations entre les observateurs et les techniques étaient calculées en utilisant le test de corrélation de Pearson. La valeur $p < 0,01$ était retenue comme seuil de significativité.

RESULTATS

Population de l'étude

Nous avons pu inclure 122 enfants âgés de 6 mois à 18 ans. La faisabilité de la méthode 3DKR pour l'évaluation des volumes et de la fonction du ventricule droit était de 100%. L'acquisition des images échographiques prenait environ 5 minutes et l'analyse post-acquisition 10 minutes environ. L'examen IRM n'a pu être réalisé chez 8 enfants : par défaut de compliance chez 5 et par contre-indication chez 3 (dispositif sous-cutané pour thérapie de l'hypertension artérielle pulmonaire) ; ces patients ont été exclus de l'étude. Les caractéristiques démographiques des 114 patients sont montrées dans le Tableau 2.

Reproductibilité

Pour l'analyse intra-observateur, les coefficients de variabilité sont de 4%, 7% et 9% respectivement pour le volume télédiastolique, le volume télésystolique et la fraction d'éjection. Pour l'analyse inter-observateur, les coefficients de variation sont de 8%, 15% et 17% respectivement pour le volume télédiastolique, le volume télésystolique et la fraction d'éjection. Les variabilités intra et inter-observateur de la méthode 3DKR sont meilleures pour le calcul du volume télédiastolique que pour le volume télésystolique. Les reproductibilités pour le calcul de la fraction d'éjection sont moins bonnes.

Pertinence

La pertinence de la méthode 3DKR était évaluée en comparant les résultats échographiques et les mesures IRM. Les résultats dans la population globale sont montrés dans le Tableau 3 et la Figure 3. Les coefficients de corrélation entre les deux méthodes sont très bons pour les mesures des volumes et bons pour le calcul de la fraction d'éjection. Les coefficients de variabilité sont bas pour la mesure du volume télédiastolique et de la fraction d'éjection et moins bons pour le volume télésystolique. Il n'existe pas de biais significatif.

Nous avons ensuite évalué la pertinence de la méthode 3DKR selon les différents types de surcharge du ventricule droit : surcharge volumétrique pure, surcharge barométrique pure et surcharge mixte. Les caractéristiques démographiques des différents groupes de patients sont montrées dans le Tableau 4. Les résultats sont montrés dans le tableau 5. Les coefficients de corrélation entre les deux méthodes sont très bons pour les mesures des volumes du ventricule droit, quel que soit le type de surcharge sauf pour la mesure du volume téléstolique du ventricule droit dans le groupe de surcharge volumique pure. Ils sont bons pour la mesure de la fraction d'éjection, sauf dans le groupe de surcharge volumique pure. Les coefficients de variation sont satisfaisants mais plus importants dans le groupe de surcharge volumique.

Nous avons évalué la capacité de la méthode 3DKR à détecter le seuil d'indication de revalvulation pulmonaire chez les patients atteints de cardiopathie conotruncale réparée avec fuite pulmonaire. Il s'agissait de 85 enfants de notre cohorte, âgés de $13,7 \pm 2,5$ ans. 23 enfants avaient un volume télédiastolique du ventricule droit $> 150 \text{ mL/m}^2$ et 16 enfants avaient une fraction d'éjection du ventricule droit $< 40\%$. Les caractéristiques du test sont montrées dans le Tableau 6. La méthode 3DKR permet d'éliminer un volume télédiastolique du ventricule droit inférieur au seuil de revalvulation avec des bonnes spécificité et valeur prédictive positive.

Nous avons ensuite évalué la pertinence de la méthode 3DKR dans le sous-groupe d'enfants avec ventricule droit systémique par hypoplasie du coeur gauche, quelque soit le stade de palliation. Il s'agissait de 12 enfants âgés de $3,7 \pm 2,6$ ans. Les résultats sont montrés dans le Tableau 7 et la Figure 4. Les corrélations entre la méthode 3DKR et les mesures IRM sont très bonnes dans cette population et significativement meilleures que celles de l'échographie en 2D ($p < 0,001$) pour la mesure des volumes et de la fraction d'éjection du ventricule droit.

DISCUSSION

Chez les patients avec cardiopathies congénitales et pédiatriques, les volumes et la fonction du ventricule droit sont des déterminants pronostics majeurs. Bien que l'échographie soit l'outil le plus accessible au quotidien, les examens en deux ou trois dimensions ont montré leurs limites pour l'évaluation du ventricule droit dans cette population. L'IRM reste le gold-standard mais est limitée par son coût, sa consommation de temps, ses contre-indications et le recours fréquent à la sédation des patients. Il est donc important de développer une nouvelle méthode simple et fiable pour évaluer les volumes et la fonction du ventricule droit dans cette population. Dans notre étude, nous avons évalué la méthode 3DKR chez 114 enfants avec différentes cardiopathies congénitales ou acquises. A notre connaissance, il s'agit de la première étude chez des enfants de tout âge (6 mois à 18 ans), quel que soit le type de surcharge du ventricule droit et avec un effectif aussi conséquent. Nous avons démontré que cette méthode est hautement faisable, reproductible et pertinente quels que soient l'âge et l'échogénicité du patient. De plus, nous avons mis en évidence la pertinence de la méthode 3DKR utilisant l'algorithme de l'hypertension pulmonaire chez les enfants avec syndrome d'hypoplasie du cœur gauche. Il s'agit de la première étude incluant des patients avec hypoplasie du cœur gauche, et ce quelque soit leur stade de palliation.

Faisabilité

Dans notre étude, la méthode 3DKR était faisable chez tous les enfants, quels que soient l'âge, le degré de coopération et l'échogénicité. De plus, nous avons dû exclure du protocole 8 enfants pour IRM irréalisable alors que la méthode 3DKR avait été un succès. C'est un réel avantage par rapport aux techniques classiques : l'IRM nécessite généralement une sédation pour les enfants de moins de 6 ans ; l'échographie 3D en temps réel nécessite une apnée de plusieurs secondes difficile à obtenir chez les enfants de moins de 8 ans ; la faible échogénicité rend difficile les mesures chez les patients âgés, en surcharge pondérale ou après chirurgie cardiaque. En effet, la méthode 3DKR ne nécessite pas le contournage de l'endocarde et les repères anatomiques sont généralement faciles à identifier, même si la qualité de l'image est sous-optimale. Il est toutefois nécessaire de dégager le mieux possible ces repères lors de l'acquisition des images.

Reproductibilité

Les reproductibilités intra et inter-observateurs étaient relativement bonnes, tous les coefficients de variation étaient inférieurs à 15% concernant les volumes. Ces valeurs sont comparables avec la reproductibilité de l'IRM qui n'est pas toujours infaillible dans cette population^{18,34-36} : d'une part, la méthode de sommation des disques de Simpson nécessite le contournage de l'endocarde sur des ventricules très trabéculés ; d'autre part, les limites entre l'anneau tricuspide et le ventricule droit ou le ventricule droit et l'anneau pulmonaire sont difficiles à individualiser en coupes petit axe³⁷. Nos valeurs de reproductibilité de la méthode 3DKR étaient légèrement moins bonnes que dans les études antérieures^{33,38-41}. Cependant, notre population différait avec un effectif globalement plus jeune et une absence de sélection des patients sur leur coopération et leur échogénicité.

Pertinence

Dans la population globale, nous avons établi une très bonne concordance inter-technique entre la méthode 3DKR et l'IRM pour l'évaluation des volumes du ventricule droit et une bonne concordance pour l'évaluation de la fraction d'éjection du ventricule droit. Il n'existait pas de biais significatif. Ces résultats sur l'évaluation des volumes du ventricule droit sont concordants avec Laser *et al*⁴² qui ont étudié la méthode 3DKR sur une population de 30 enfants âgés de 13 +/- 8 ans atteints de cardiopathies avec différents types de surcharge du ventricule droit (tétralogie de Fallot chez 20, shunt gauche - droit chez 5 et transposition des gros vaisseaux avec chirurgie de Mustard chez 5). Ils retrouvaient une meilleure concordance pour l'évaluation de la fraction d'éjection du ventricule droit. Cependant leur population d'enfants atteints de cardiopathies était incluse dans un groupe de 60 patients dont 30 n'avaient pas de cardiopathies. De plus, la faisabilité de la technique de 88% dans leur étude, en rapport avec une mauvaise échogénicité, peut surestimer la concordance par rapport à notre population. La différence des définitions conventionnelles des volumes télédiastoliques et télésystoliques entre l'échographie (définition électrique) et l'IRM (définition visuelle) peut altérer nos résultats ; une harmonisation des pratiques, présente dans les différentes études sur la méthode 3DKR, devrait permettre d'améliorer la concordance inter-technique.

Nous avons ensuite étudié cette concordance intertechnique en fonction des différents types de contraintes du ventricule droit. Le type de surcharge influait peu sur la fiabilité des mesures, même si la concordance était plus forte dans les sous-groupes de surcharge barométrique pure ou de surcharge mixte. La littérature est discordante à ce sujet. D'un côté nos résultats sont concordants avec une partie de la littérature qui retrouvait des concordances moins bonnes dans les surcharges de volume⁴³ que de pression⁴⁴. D'un autre côté, Kutty *et al*⁴⁵ retrouvaient une concordance inter-technique significativement moins bonne chez 15 adultes avec surcharge de pression du ventricule droit par transposition des gros vaisseaux après intervention de Mustard ; de plus, Dragulescu *et al*^{38,40} ont montré, dans leur population d'enfants avec surcharge de volume du ventricule droit par tétralogie de Fallot réparée, que le biais de la mesure était proportionnel à l'épaisseur de la paroi libre du ventricule droit (bien que celle-ci ne dépassait pas 4 mm dans leur population). Au regard de nos résultats, nous suspectons un impact négatif modéré de la dilatation ventriculaire sur la pertinence de la méthode 3DKR. Une hypothèse avancée est la présence d'anomalies localisées de type anévrisme infundibulaire, fréquentes dans les cardiopathies avec surcharge de volume⁴⁶⁻⁴⁸ et non toujours visualisables sur les coupes standardisées du ventricule droit. En effet, cette zone anévrismale est très antérieure, dans la zone où la résolution de l'échographie est moins bonne. La recherche attentive de cet anévrisme à l'échographie et sa prise compte dans le contourage devrait permettre d'améliorer les corrélations avec l'IRM qui n'a pas les mêmes limites⁴⁵.

La fuite pulmonaire est une séquelle fréquente après réparation chirurgicale des tétralogies de Fallot et autres cardiopathies avec obstruction de la voie d'éjection du ventricule droit. Cette surcharge de volume chronique cause une dilatation et une altération des fonctions systolique et diastolique du ventricule droit associées à long terme à l'insuffisance cardiaque, aux troubles du rythme ventriculaires et un risque majoré de mort subite⁶. La prophylaxie est la valvulation pulmonaire percutanée⁵⁰ dont l'une des indications est un volume télédiastolique du ventricule droit > 150 mL/m² à l'IRM chez un patient asymptomatique^{6,10-14}. Dans notre étude, la technique 3DKR permettait de détecter les enfants avec un volume télédiastolique non pathologique < 150 mL/m² avec une spécificité de 93% et une valeur prédictive positive de 90% dans notre population avec cardiopathies conotruncales réparées. A notre connaissance, il s'agit de la première étude à évaluer les caractéristiques de la 3DKR comme test de dépistage. Après une évaluation de cet outil sur un effectif plus important, la technique 3DKR pourrait permettre de

restreindre l'indication à l'IRM aux patients ayant un volume télédiastolique du ventricule droit > 150 mL/m² mesuré en 3DKR.

Chez les enfants avec hypoplasie du cœur gauche, l'évaluation des volumes et de la fonction du ventricule droit systémique en échographie 2D ou 3D en temps réel est difficile⁵¹⁻⁵³. Dans notre étude, l'évaluation des volumes et de la fonction du ventricule droit par la technique 3DKR était particulièrement fiable dans cette indication, quels que soient l'âge et le stade de palliation, bien que nous ayons utilisé un algorithme non spécifique (celui de l'hypertension artérielle pulmonaire) par défaut d'algorithme adapté. De plus, nous avons pu mettre en évidence la supériorité de cette technique par rapport à l'échographie 2D.

Limites

Notre étude présente plusieurs limites liées à son design. Premièrement, la représentativité de notre cohorte est discutable car nous avons inclus uniquement des patients convoqués pour un examen IRM avec une indication clinique basée sur des signes de gravité ; notre cohorte ne reflète donc que les patients avec les atteintes les plus graves. D'autre part, les faibles effectifs en sous-groupes sont le reflet de l'accès difficile à l'IRM.

D'autres limites sont liées à la technique. Celle-ci nécessite du matériel spécial difficilement déplaçable, la familiarisation de l'opérateur avec un logiciel supplémentaire et une table d'examen non ferro-magnétique qui pourrait perturber le système magnétique. L'évaluation des volumes et de la fonction du ventricule droit nécessite un temps supplémentaire d'acquisition des images et d'analyse post-acquisition, mais fournit en moins de temps que l'IRM⁴⁰ des paramètres non mesurables par les techniques échographiques standard. L'absence de nécessité de contourner l'endocarde est un des principaux atouts de cette technique mais rend impossible le calcul de la masse myocardique, renseignement utile dans le suivi de certaines pathologies.

La 3DKR nécessite l'absence de changement de position entre les différentes acquisitions ; il est donc primordial de prendre les images en un minimum de temps et d'exclure celles-ci dès qu'un changement de position est suspecté. Cependant, nous avons pu réaliser cet examen chez des enfants à partir de 6 mois avec une très bonne corrélation à l'IRM.

Enfin, cette technique est dépendante de la base de données. Dans notre série nous avons inclus des enfants atteints de cardiopathies pour lesquelles aucun algorithme spécifique

n'était disponible (conduits ventricule droit - artère pulmonaire, hypoplasie du cœur gauche). Ces derniers sont en cours de réalisation.

CONCLUSION

Chez les enfants atteints de cardiopathies congénitales ou pédiatriques avec surcharge du ventricule droit, l'évaluation des volumes et de la fonction du ventricule droit par la technique 3DKR est faisable et bien corrélée aux mesures par imagerie par résonnance magnétique. Elle est plus fiable en cas de surcharge de pression que de volume.

Cette technique est un bon outil pour détecter les volumes télédiastoliques $< 150 \text{ mL/m}^2$ chez les patients avec cardiopathies conotruncales réparées avec fuite pulmonaire. A ce jour, elle est la seule technique échographique fiable pour l'évaluation du ventricule droit chez les enfants avec hypoplasie du cœur gauche. La généralisation de cette technique pourrait restreindre le recours à l'IRM dans certaines indications.

Une étude d'évaluation de la pertinence de la 3DKR comparée aux techniques usuelles pour évaluer les volumes et la fonction du ventricule gauche chez les enfants atteints de cardiopathies congénitales avec surcharge du ventricule droit semblerait prometteuse.

BIBLIOGRAPHIE

1. Roche SL, Redington AN. The failing right ventricle in congenital heart disease. *Can J Cardiol* 2013;29:768-78.
2. Tezuka F, Hort W, Lange PE, Nürnberg JH. Muscle fiber orientation in the development and regression of right ventricular hypertrophy in pigs. *Acta Pathol Jpn* 1990;40:402-7.
3. Redington AN, Rigby ML, Shinebourne EA, Oldershaw PJ. Changes in the pressure-volume relation of right ventricle when its loading conditions are modified. *Br Heart J* 1990;63:45-59.
4. Sanchez-Quintana D, Anderson RH, Yen Ho S. Ventricular myoarchitecture in tetralogy of Fallot. *Heart* 1996;76:280-6.
5. Pettersen E, Helle-Valle T, Edvardsen T, Lindberg H, Smith HJ, et al. Contraction pattern of the systemic right ventricle shift from longitudinal to circumferential shortening and absent global ventricular torsion. *J Am Coll Cardiol* 2007;49:2450-6.
6. Baumgartner H, Bonhoeffer P, De Groot NM, de Haan F, Deanfield JE, et al. ESC Guidelines for the management of grown-up congenital heart disease (new version 2010). Task Force on the Management of Grown-up Congenital Heart Disease of the European Society of Cardiology (ESC); Association for European Pediatric Society of Cardiology (AEPC); ESC Committee for Practice Guidelines (CPG); *Eur Heart J* 2010;31:2915-57.
7. Ivy DD, Abman SH, Barst RJ, Berger RM, Bonnet D et al. Pediatric pulmonary hypertension. *J Am Coll Cardiol* 2013;62(25 Suppl):D117-26.
8. Knauth AL, Gauvreau K, Powell AJ, Landzberg MJ, Walsh EP, et al. Ventricular size and function assessed by cardiac MRI predict major adverse clinical outcomes late after tetralogy of Fallot repair. *Heart* 2008;94:211-6.
9. van Wolferen SA, Marcus JT, Boonstra A, Marques KM, Bronzwaer JG, et al. Prognostic value of right ventricular mass, volume, and function in idiopathic pulmonary arterial hypertension. *Eur Heart J* 2007;28:1250-7.
10. Buechel ER, Dave HH, Kellenberger CJ. Remodeling of the right ventricle after early pulmonary valve replacement in 1540 children with repaired tetralogy of Fallot: assessment by cardiovascular magnetic resonance. *Eur Heart J* 26:2721-7.
11. Geva T. Repaired tetralogy of Fallot: the roles of cardiovascular magnetic resonance in evaluating pathophysiology and for pulmonary valve replacement decision support. *J Cardiovasc Magn Reson* 2011;37:13-9.
12. Therrien J, Provost Y, Merchant N, Williams WG, Colman J, et al. Optimal timing for

pulmonary valve replacement in adults after tetralogy of Fallot repair. *Am J Cardiol* 2005;95:779–82.

13. Oosterhof T, van Straten A, Vliegen HW, Meijboom FJ, van Dijk APJ, et al. Preoperative thresholds for pulmonary valve replacement in patients with corrected tetralogy of Fallot using cardiovascular magnetic resonance. *Circulation* 2007;116:545–51.

14. Dave HH, Buechel ER, Dodge-Khatami A, Kadner A, Rousson V, et al. Early insertion of a pulmonary valve for chronic regurgitation helps restoration of ventricular dimensions. *Ann Thorac Surg* 2005;80:1615–20.

15. Higgins CB, Holt W, Pflugfelder P. Functional evaluation of the heart with magnetic resonance imaging. *Magn Reson Med* 1988;6:121–39.

16. Pujadas S, Reddy GP, Weber O et al (2004) MR imaging assessment of cardiac function. *J Magn Reson Imaging* 2004;19:789–99.

17. Luijnenburg SE, Robbers-Visser D, Moelker A. Intra-observer and interobserver variability of biventricular function, volumes and mass in patients with congenital heart disease measured by CMR imaging. *Int J Cardiovasc Imaging* 2010;26:57–64.

18. Mooij CF, de Wit CJ, Graham DA, Powell AJ, Geva T. Reproducibility of MRI measurements of right ventricular size and function in patients with normal and dilated ventricles. *J Magn Reson Imaging* 2008;28:67–73.

19. Clarke CJ, Gurka MJ, Norton PT, Kramer CM, Hoyer AW. Assessment of the accuracy and reproducibility of RV volume measurements by CMR in congenital heart disease. *JACC Cardiovasc Imaging* 2012;5:28-37.

20. Ho SY, Nihoyannopoulos P. Anatomy, echocardiography, and normal right ventricular dimensions. *Heart* 2006;92(Suppl 1):i2-13.

21. Mertens LL, Friedberg MK. Imaging the right ventricle—current state of the art. *Nat Rev Cardiol* 2010;7:551-63.

22. Helbing WA, Bosch HG, Maliepaard C, Rebergen SA, van der Geest RJ, et al. Comparison of echocardiographic methods with magnetic resonance imaging for assessment of right ventricular function in children. *Am J Cardiol* 1995; 76:589 –94.

23. Selly JB, Iriart X, Roubertie F, Mauriat P, Marek J, et al. Multivariable assessment of the right ventricle by echocardiography in patients with repaired tetralogy of Fallot undergoing pulmonary valve replacement: a comparative study with magnetic resonance imaging. *Arch Cardiovasc Dis* 2015;108:5-15.

24. Srinivasan C, Sachdeva R, Morrow WR, Greenberg SB, Vyas HV. Limitations of standard echocardiographic methods for quantification of right ventricular size and function in

children and young adults. *J Ultrasound Med* 2011;30:487-93.

25. van der Zwaan HB, Helbing WA, McGhie JS, Geleijnse ML, Luijnenburg SE, et al. Clinical value of real-time three-dimensional echocardiography for right ventricular quantification in congenital heart disease: validation with cardiac magnetic resonance imaging. *J Am Soc Echocardiogr* 2010;23:134-40.

26. Knight DS, Grasso AE, Quail MA, Muthurangu V, Taylor AM, et al. Accuracy and reproducibility of right ventricular quantification in patients with pressure and volume overload using single-beat three-dimensional echocardiography. *J Am Soc Echocardiogr* 2015;28:363-74.

27. Balluz R, Liu L, Zhou X, Ge S. Real time three-dimensional echocardiography for quantification of ventricular volumes, mass, and function in children with congenital and acquired heart diseases. *Echocardiography* 2013;30:472-82.

28. Shimada YJ, Shiota M, Siegel RJ. Accuracy of right ventricular volumes and function determined by three-dimensional echocardiography in comparison with magnetic resonance imaging: A meta-analysis study. *J Am Soc Echocardiogr* 2010;23:943-53.

29. Crean AM, Maredia N, Ballard G, Menezes R, Wharton G, et al. 3D Echo systematically underestimates right ventricular volumes compared to cardiovascular magnetic resonance in adult congenital heart disease patients with moderate or severe RV dilatation. *J Cardiovasc Magn Reson* 2011;13:78-87.

30. Khoo NS, Young A, Occleshaw C, Cowan B, Zeng IS, et al. Assessments of right ventricular volume and function using three-dimensional echocardiography in older children and adults with congenital heart disease: comparison with cardiac magnetic resonance imaging. *J Am Soc Echocardiogr* 2009;22:1279-88.

31. Renella P, Marx GR, Zhou J, Gauvreau K, Geva T. Feasibility and reproducibility of three-dimensional echocardiographic assessment of right ventricular size and function in pediatric patients. *J Am Soc Echocardiogr* 2014;27:903-10.

32. Wong SP, Johnson RK, Sheehan FH. Rapid and accurate left ventricular surface generation from three-dimensional echocardiography by a catalog-based method. *Int J Cardiovasc Imaging* 2003;19:9-17.

33. Sheehan FH, Kilner PJ, Sahn DJ, Vick GW, Stout KK, et al. Accuracy of knowledge-based reconstruction for measurement of right ventricular volume and function in patients with tetralogy of Fallot. *Am J Cardiol* 2010;105:993-9.

34. Beerbaum P, Barth P, Kropf S. Cardiac function by MRI in congenital heart disease: impact of consensus training on interinstitutional variance. *J Magn Reson Imaging* 2009;30:956–66.
35. Caudron J, Fares J, Lefebvre V. Cardiac MRI assessment of right ventricular function in acquired heart disease: factors of variability. *Acad Radiol* 2012;19:991–1002.
36. Winter MM, Bernink FJ, Groenink M. Evaluating the systemic right ventricle by CMR: the importance of consistent and reproducible delineation of the cavity. *J Cardiovasc Magn Reson* 2008;10:40-54.
37. Grothues F, Moon JC, Bellenger NG, Smith GS, Klein HU, *et al.* Interstudy reproducibility of right ventricular volumes, function, and mass with cardiovascular magnetic resonance. *Am Heart J* 2004;147:218–23.
38. Dragulescu A, Grosse-Wortmann L, Fackoury C, Riffle S, Waiss M, *et al.* Echocardiographic Assessment of Right Ventricular Volumes after Surgical Repair of Tetralogy of Fallot: Clinical Validation of a New Echocardiographic Method. *J Am Soc Echocardiogr* 2011;24:1191-8.
39. Dragulescu A, Grosse-Wortmann L, Fackoury C, Mertens L. Echocardiographic assessment of right ventricular volumes: a comparison of different techniques in children after surgical repair of tetralogy of Fallot. *Eur Heart J Cardiovasc Imaging* 2012;13:596–604.
40. Nyns ECA, Dragulescu A, Yoo SH, Grosse-Wortmann L. Evaluation of knowledge-based reconstruction for magnetic resonance volumetry of the right ventricle in tetralogy of Fallot. *Pediatr Radiol* 2014;44:1532–40.
41. Knight DS, Schwaiger JP, Krupickova S, Davar J, Muthurangu V, *et al.* Accuracy and Test-Retest Reproducibility of Two-Dimensional Knowledge-Based Volumetric Reconstruction of the Right Ventricle in Pulmonary Hypertension. *J Am Soc Echocardiogr* 2015;28:989-98.
42. Laser KT, Horst JP, Barth P, Kelter-Klopping A, Haas NA, Burchert W, *et al.* Knowledge-Based Reconstruction of Right Ventricular Volumes Using Real-time Three-dimensional Echocardiographic as Well as Cardiac Magnetic Resonance Images: Comparison With a Cardiac Magnetic Resonance Standard. *J Am Soc Echocardiogr* 2014;27:1087-97.
43. Neukamm C, Try K, Norgard G, Brun H. Right ventricular volumes assessed by echocardiographic three-dimensional knowledge-based reconstruction compared with magnetic resonance imaging in a clinical setting. *Congenit Heart Dis* 2014;9:333-42.
44. Bhave N, Patel AR, Weinert L, Yamat M, Freed B, *et al.* Three-Dimensional Modeling of the Right Ventricle from Two-Dimensional Transthoracic Echocardiographic Images:

Utility of Knowledge-Based Reconstruction in Pulmonary Arterial Hypertension. *J Am Soc Echocardiogr* 2013;26:860-7.

45. Kutty S, Li L, Polak A, Gribben P, Danford D. Echocardiographic Knowledge-Based Reconstruction for Quantification of the Systemic Right Ventricle in Young Adults With Repaired D-Transposition of Great Arteries. *Am J Cardiol* 2012;109:881-8.

46. Boudjemline Y, Bonnet D, Agnoletti G, Vouhé P. Aneurism of the right ventricular outflow following bovine valved venous conduit insertion. *Eur J Cardiothorac Surg* 2003;23:122-4.

47. Inoue Y, Igawa O, Iitsuka K. Aneurysm of the right ventricular outflow tract after surgical repair of Tetralogy of Fallot: three-dimensional computed tomography findings. *Eurospace* 2009;11:130.

48. Ordovas KG, Muzzarelli S, Hope MD, Naeger DM, Karl T, *et al.* Cardiovascular MR imaging after surgical correction of tetralogy of Fallot: approach based on understanding of surgical procedures. *Radiographics* 2013;33:1037-52.

49. Leonardi B, Taylor AM, Mansi T, Voigt I, Sermesant M, *et al.* Computational modeling of the right ventricle in repaired tetralogy of Fallot: can it provide insight into patient treatment? *Eur Heart J Cardiovasc Imaging* 2013;14:381-6.

50. Bonhoeffer P, Boudjemline Y, Qureshi SA, Le Bidois J, Iserin L, *et al.* Percutaneous insertion of the pulmonary valve. *J Am CollCardiol* 2002;39:1664-9.

51. Bellsham-Revell HR, Simpson JM, Miller OI, Bell AJ. Subjective evaluation of right ventricular systolic function in hypoplastic left heart syndrome: how accurate is it? *J Am Soc Echocardiogr* 2013;26:52-6.

52. Bell A, Rawlins D, Bellsham-Revell H, Miller O, Racazi R, *et al.* Assessment of right ventricular volumes in hypoplastic left heart syndrome by real-time three-dimensional echocardiography: comparison with cardiac magnetic resonance imaging. *Eur Heart J Cardiovasc Imaging* 2014;15:257-66.

53. Avitabile CM, Whitehead K, Fogel M, Mercer-Rosa L. Tricuspid annular plane systolic excursion does not correlate with right ventricular ejection fraction in patients with hypoplastic left heart syndrome after Fontan palliation. *Pediatr Cardiol* 2014;35:1253-8.

ANNEXE 1 : TABLEAUX

Tableau 1 : Incidences nécessaires au protocole.

Incidence	Région d'intérêt
Apicale 4 cavités	Anneau tricuspide, bulge basal, endocarde, septum
Apicale 2 cavités du ventricule droit	Anneau tricuspide, paroi inférieure, endocarde, anneau pulmonaire
Apicale 4 cavités modifiée	Apex
Parasternale grand axe centrée sur la valve mitrale	Septum interventriculaire, endocarde
Parasternale grand axe centrée sur la valve tricuspide	Anneau tricuspide, endocarde
Parasternale grand axe centrée sur la valve pulmonaire	Anneau pulmonaire, endocarde, voie d'éjection
Parasternale petit axe centrée sur la valve pulmonaire	Anneau pulmonaire, septum conal, endocarde
Parasternale petit axe centrée sur la base	Septum interventriculaire, endocarde
Parasternale petit axe centrée sur les piliers	Septum interventriculaire, endocarde
Sous-costale 4 cavités	Endocarde, apex, septum
Sous-costale sagittale	Endocarde, voie d'éjection

Tableau 2 : Caractéristiques démographiques de la population de l'étude.

Caractéristiques	n=114
Mâles	72
Âge (Années)	12,3 +/- 3,7
Surface cutanée (m²)	1,3 +/- 0,3
Volume télédiastolique du ventricule droit (IRM) (mL)	167,4 +/- 54,9
Volume télésystolique du ventricule droit (IRM) (mL)	92,8 +/- 34,6
Fraction d'éjection du ventricule droit (IRM) (%)	44,9 +/- 6,7
Diagnostic	
Tétralogie de Fallot réparée	64
Atrésie pulmonaire réparée	14
Tronc artériel commun réparé	7
Hypoplasie du cœur gauche	12
Transposition des gros vaisseaux	2
Hypertension artérielle pulmonaire	4
Sténose pulmonaire	7
Communication inter-auriculaire	3

Tableau 3 : Variabilité inter-méthode comparant la méthode 3KR et l'IRM dans la population globale.

	Indice de corrélation interclasse	Coefficient de variation	Biais
Volume télédiastolique du VD	0,90	13%	1%
Volume télésystolique du VD	0,87	19%	3%
Fraction d'éjection du VD	0,64	14%	1%

VD, Ventricule droit.

Tableau 4 : Caractéristiques démographiques des 3 groupes de patients selon le type de surcharge du ventricule droit.

Caractéristiques	Surcharge volumique	Surcharge mixte	Surcharge barométrique
Effectif	63	24	27
Âge (Années)	13,5 +/- 2,5	13,3 +/- 3,8	8,8 +/- 4,6
Surface cutanée (m²)	1,4 +/- 0,3	1,4 +/- 0,3	1,0 +/- 0,4
Volume télédiastolique du ventricule droit (IRM) (mL)	194,9 +/- 47,0	164,5 +/- 54,5	107,1 +/- 32,2
Volume télésystolique du ventricule droit (IRM) (mL)	105,1 +/- 31,1	95,3 +/- 45,6	63,1 +/- 19,8
Fraction d'éjection du ventricule droit (IRM) (mL)	46,8 +/- 5,3	45,0 +/- 9,1	40,7 +/- 6,2

Tableau 5 : Variabilité inter-méthode comparant la méthode 3DKR et l'IRM dans les différents types de surcharge du ventricule droit.

		Indice de corrélation interclasse	Coefficient de variation	Biais
Surcharge volumique	VTDVD	0,82	14%	1%
	VTSVD	0,76	20%	4%
	FEVD	0,46	15%	1%
Surcharge mixte	VTDVD	0,95	12%	1%
	VTSVD	0,93	16%	7%
	FEVD	0,73	15%	3%
Surcharge barométrique	VTDVD	0,92	13%	2%
	VTSVD	0,92	9%	0%
	FEVD	0,65	11%	1%

VTDVD, Volume télédiastolique du ventricule droit ; VTSVD, Volume télésystolique du ventricule droit ; FEVD, Fraction d'éjection du ventricule droit.

Tableau 6 : Caractéristiques de la méthode 3DKR pour la détection du seuil d'indication de revalvulation pulmonaire chez les patients atteints de cardiopathie conotruncale réparée avec fuite pulmonaire.

	Sensibilité	Spécificité	Valeur prédictive positive	Valeur prédictive négative
RV-VTD < 150 mL/m²	83%	93%	90%	88%
FEVD > 40%	90%	38%	80%	59%

RV-VTD, Volume télédiastolique du ventricule droit ; FEVD, Fraction d'éjection du ventricule droit.

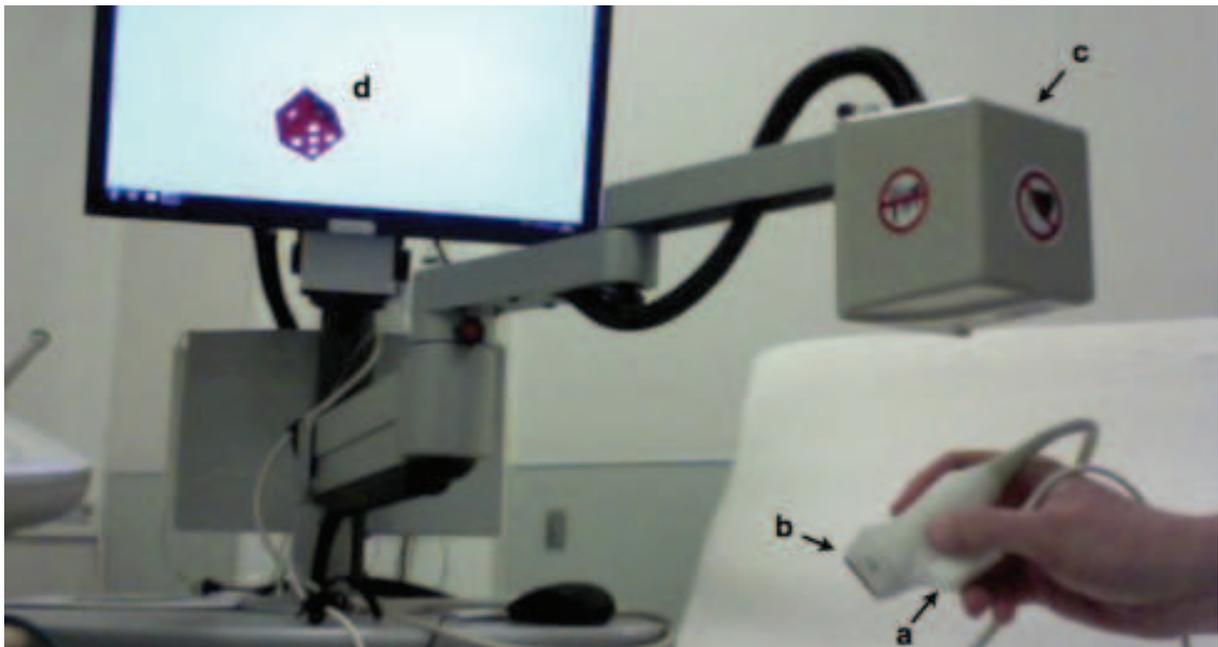
Tableau 7 : Variabilité inter-méthode comparant la méthode 3DKR et l'échographie 2D à l'IRM pour la mesure des volumes et de la fraction d'éjection du ventricule droit chez les enfants avec hypoplasie du cœur gauche.

		Indice de corrélation interclasse	Coefficient de variation	Biais
3DKR	VTDVD	0,94	10%	1%
	VTSVD	0,93	12%	0%
	FEVD	0,76	11%	0%
Echographie 2D	VTDVD	0,90	15%	4%
	VTSVD	0,80	17%	2%
	FEVD	0,58	14%	1%

3DKR, échographie 3D par méthode de reconstruction ; VTDVD, Volume télédiastolique du ventricule droit ; VTSVD, Volume télésystolique du ventricule droit ; FEVD, Fraction d'éjection du ventricule droit.

ANNEXE 2 : FIGURES

Figure 1 : Illustration du système Ventripoint. La sonde localisatrice (a) est attachée à la sonde d'échographie 2D conventionnelle (b). Les coordonnées spatiales sont évaluées par rapport au générateur de champ magnétique (c). Les images échographiques sont visualisées sur un ordinateur spécifique (d).



D'après *Knight et al*⁴¹, en raison des mauvaises conditions d'exposition dans la salle d'échographie.

Figure 2 : Incidences nécessaires au protocole. Les repères anatomiques clés sont marqués par des points colorés.

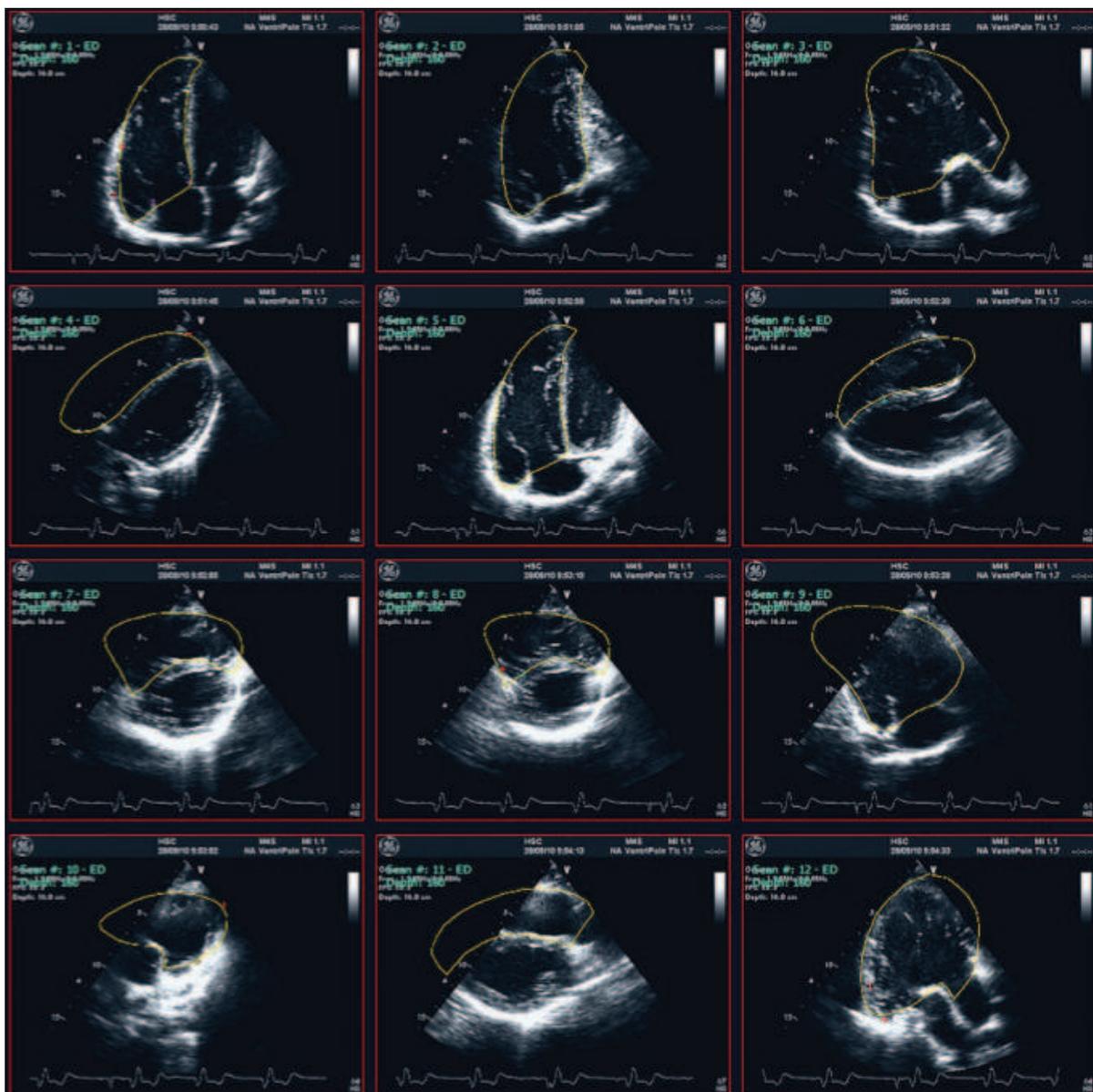
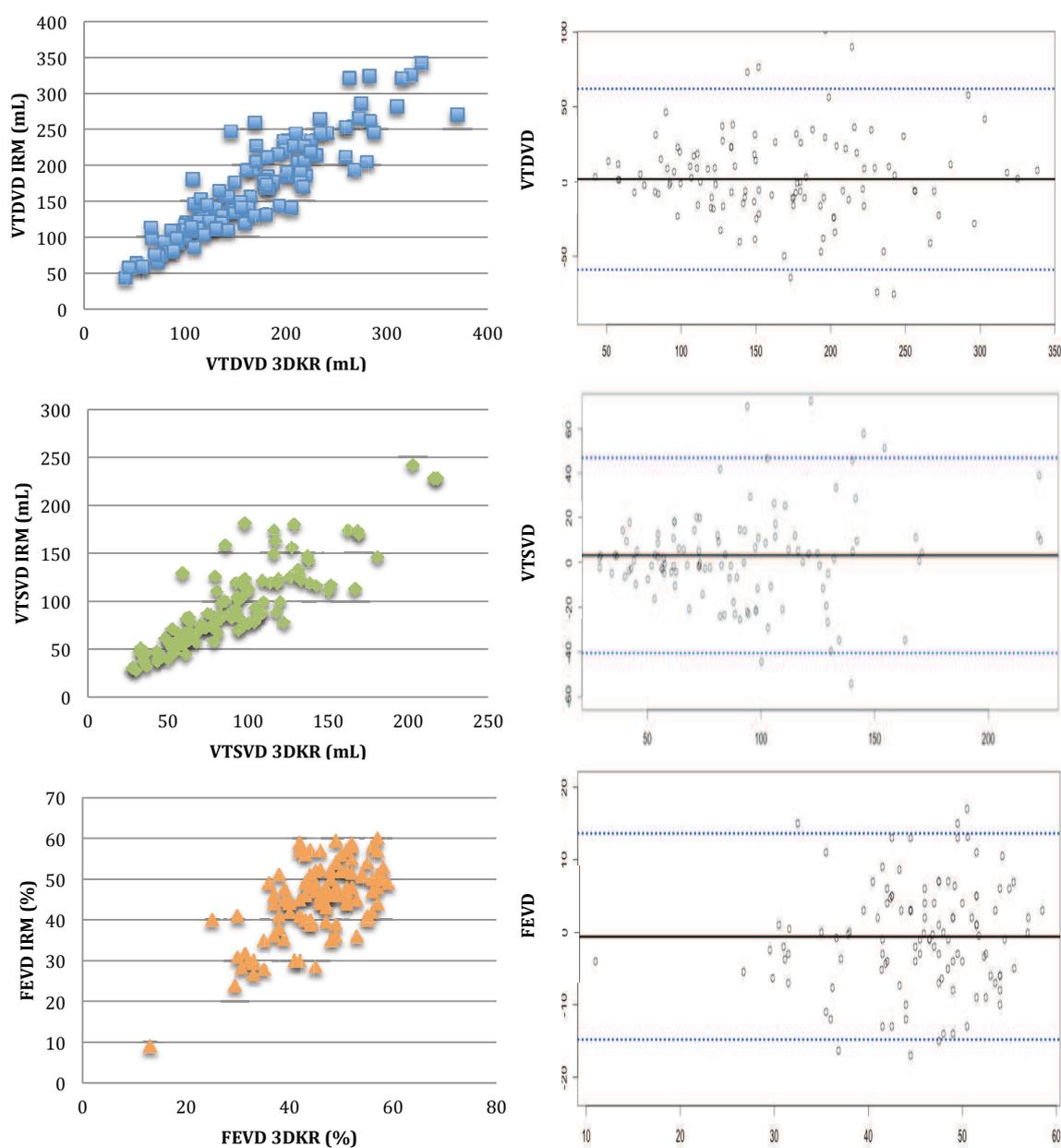
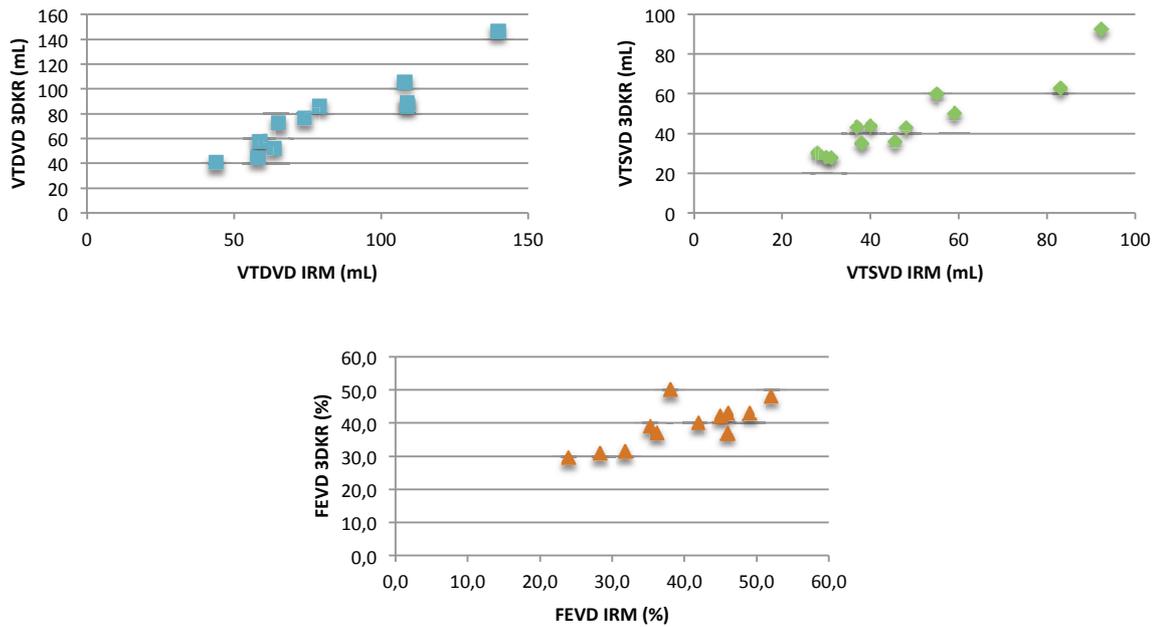


Figure 3 : Corrélation représentée par analyse de régression (à gauche) et agrément intertechnique représenté par diagramme de Bland-Altman (à droite) entre la méthode 3DKR et les mesures IRM des volumes et de la fraction d'éjection du ventricule droit dans la population générale.



VTDVD, Volume télédiastolique du ventricule droit ; VTSVD, Volume télésystolique du ventricule droit ; FEVD, Fraction d'éjection du ventricule droit ; IRM, Imagerie par résonance magnétique ; 3DKR, échographie 3D par méthode de reconstruction.

Figure 4 : Corrélation représentée par analyse de régression entre la méthode 3DKR et les mesures IRM des volumes et de la fraction d'éjection du ventricule droit chez les patients avec hypoplasie du cœur gauche.



VTDVD, Volume télédiastolique du ventricule droit ; VTSVD, Volume télésystolique du ventricule droit ; FEVD, Fraction d'éjection du ventricule droit ; IRM, Imagerie par résonance magnétique ; 3DKR, échographie 3D par méthode de reconstruction.

RESUME EN FRANCAIS

Une nouvelle technique d'échographie en trois dimensions basée sur la reconnaissance (3DKR) a été développée pour l'étude du ventricule droit (VD). Le but de cette étude était d'évaluer la fiabilité de la 3DKR chez des enfants atteints de cardiopathies congénitales avec différents types de surcharge du VD.

114 enfants de 6 mois à 18 ans convoqués pour IRM cardiaque ont été inclus : 63 avec surcharge de volume, 27 avec surcharge de pression et 24 avec surcharge mixte. La faisabilité est de 100%. Corrélation avec les mesures IRM dans la population globale : pour le volume télédiastolique (VTDVD), ICC=0,90 et Var=13% ; pour le volume télésystolique (VTSVD) ICC=0,87 et Var=19% ; et pour la fraction d'éjection (FEVD), ICC=0,64 et Var=14%. Pas de biais significatif. La corrélation est meilleure en cas de surcharge de pression que de volume : ICC=0,92 vs 0,82 pour le VTDVD ; ICC=0,92 vs 0,76 pour le VTSVD ; et ICC=0,65 vs 0,46 pour la FEVD. Corrélation avec les mesures IRM dans le groupe d'hypoplasie du cœur gauche : pour le VTDVD, ICC=0,94 et Var=10% ; pour le VTSVD, ICC=0,93 et Var=12% ; et pour la FEVD, ICC=0,76 et Var=11%.

Les volumes en 3DKR sont faisables et bien corrélés aux mesures IRM chez l'enfant ; la corrélation est meilleure chez les patients avec surcharge de pression que de volume. La 3DKR est fiable pour évaluer les volumes et fonction du VD chez les enfants avec hypoplasie du cœur gauche.

RESUME EN ANGLAIS

New three-dimensional knowledge-based reconstruction imaging (3DKR) was developed to evaluate the right ventricle (RV). The aim of this study was to assess accuracy of 3DKR in children with congenital heart diseases with different types of RV overload.

114 children aged of 6 months to 18 years referred for MRI were included: 63 had volumetric overload, 27 had barometric overload, and 24 had mixed overload. Feasibility of 3D-KR is 100%. Correlation between 3DKR RV volumes and CMR: for end-diastolic volume (RVEDV), ICC=0.90 and Var=13%; for end-systolic volume (RVESV), ICC=0.87 and Var=19%; for ejection fraction (RVEF), ICC=0.64 and Var=14%. No significant bias. Correlation is worse with barometric than volumetric overload: ICC=0,92 vs 0,82 for RVEDV; ICC=0,92 vs 0,76 for RVESV; and ICC=0,65 vs 0,46 for RVEF. Correlation between 3DKR RV volumes and CMR in patients with hypoplastic left heart syndrome: for RVEDV, ICC=0,94 and Var=10%; for RVESV, ICC=0,93 and Var=12%; and for RVEF, ICC=0,76 and Var=11%.

3DKR volumes are feasible and correlated well with CMR volumes in children, better in patients with barometric overload than in patients with predominant volumetric overload. 3DKR is accurate to evaluate RV volumes and function in children with hypoplastic left heart syndrome.



UNIVERSITE DE POITIERS

Faculté de Médecine et de
Pharmacie



SERMENT



En présence des Maîtres de cette école, de mes chers condisciples et devant l'effigie d'Hippocrate, je promets et je jure d'être fidèle aux lois de l'honneur et de la probité dans l'exercice de la médecine. Je donnerai mes soins gratuits à l'indigent et n'exigerai jamais un salaire au-dessus de mon travail. Admis dans l'intérieur des maisons mes yeux ne verront pas ce qui s'y passe ; ma langue taira les secrets qui me seront confiés, et mon état ne servira pas à corrompre les mœurs ni à favoriser le crime. Respectueux et reconnaissant envers mes Maîtres, je rendrai à leurs enfants l'instruction que j'ai reçue de leurs pères.

Que les hommes m'accordent leur estime si je suis fidèle à mes promesses ! Que je sois couvert d'opprobre et méprisé de mes confrères si j'y manque !



RESUME EN FRANCAIS

Une nouvelle technique d'échographie en trois dimensions basée sur la reconnaissance (3DKR) a été développée pour l'étude du ventricule droit (VD). Le but de cette étude était d'évaluer la fiabilité de la 3DKR chez des enfants atteints de cardiopathies congénitales avec différents types de surcharge du VD.

114 enfants de 6 mois à 18 ans convoqués pour IRM cardiaque ont été inclus : 63 avec surcharge de volume, 27 avec surcharge de pression et 24 avec surcharge mixte. La faisabilité est de 100%. Corrélation avec les mesures IRM dans la population globale : pour le volume télédiastolique (VTDVD), ICC=0,90 et Var=13% ; pour le volume télésystolique (VTSVD) ICC=0,87 et Var=19% ; et pour la fraction d'éjection (FEVD), ICC=0,64 et Var=14%. Pas de biais significatif. La corrélation est meilleure en cas de surcharge de pression que de volume : ICC=0,92 vs 0,82 pour le VTDVD ; ICC=0,92 vs 0,76 pour le VTSVD ; et ICC=0,65 vs 0,46 pour la FEVD. Corrélation avec les mesures IRM dans le groupe d'hypoplasie du cœur gauche : pour le VTDVD, ICC=0,94 et Var=10% ; pour le VTSVD, ICC=0,93 et Var=12% ; et pour la FEVD, ICC=0,76 et Var=11%.

Les volumes en 3DKR sont faisables et bien corrélés aux mesures IRM chez l'enfant. La corrélation est meilleure chez les patients avec surcharge de pression que de volume. La 3DKR est fiable pour évaluer les volumes et fonction du VD chez les enfants avec hypoplasie du cœur gauche.

TITRE EN ANGLAIS

Knowledge-based 3D reconstruction compared to MRI for evaluation of right ventricular volumes and function in congenital heart diseases with right ventricular overload.

RESUME EN ANGLAIS

New three-dimensional knowledge-based reconstruction imaging (3DKR) was developed to evaluate the right ventricle (RV). The aim of this study was to assess accuracy of 3DKR in children with congenital heart diseases with different types of RV overload.

114 children aged of 6 months to 18 years referred for MRI were included: 63 had volumetric overload, 27 had barometric overload, and 24 had mixed overload. Feasibility of 3D-KR is 100%. Correlation between 3DKR RV volumes and CMR: for end-diastolic volume (RVEDV), ICC=0.90 and Var=13%; for end-systolic volume (RVESV), ICC=0.87 and Var=19%; for ejection fraction (RVEF), ICC=0.64 and Var=14%. No significant bias. Correlation is worse with barometric than volumetric overload: ICC=0,92 vs 0,82 for RVEDV; ICC=0,92 vs 0,76 for RVESV; and ICC=0,65 vs 0,46 for RVEF. Correlation between 3DKR RV volumes and CMR in patients with hypoplastic left heart syndrome: for RVEDV, ICC=0,94 and Var=10%; for RVESV, ICC=0,93 and Var=12%; and for RVEF, ICC=0,76 and Var=11%.

3DKR volumes are feasible and correlated well with CMR volumes in children, better in patients with barometric overload than in patients with predominant volumetric overload. 3DKR is accurate to evaluate RV volumes and function in children with hypoplastic left heart syndrome.

MOTS-CLES : Volumes, Ventricule droit, Cardiopathies congénitales, Hypoplasie du cœur gauche.