

Avancées récentes en échocardiographie – advanced imaging in echocardiography

Mladen Pavlovic^a, Berne et Susanne Navarini^b, Bâle

Traduction: Rudolf Schlaepfer, La Chaux-de-Fonds

- a) Cardiologie pédiatrique, Centre pour malformations cardiaques congénitales, Clinique universitaire de cardiologie, CH-3010 Berne
b) Cardiologie pédiatrique, Clinique pédiatrique universitaire des deux Bâle, CH-4056 Bâle

Introduction

L'échographie est la technique d'imagerie la plus utilisée en cardiologie pédiatrique. La méthode est non-invasive et nous fournit, lorsqu'il s'agit d'investiguer une malformation cardiaque congénitale ou toute autre problème cardiovasculaire, les informations à propos des deux questionnements les plus importants: la morphologie et la fonction cardiaques. Outre l'anamnèse et l'examen clinique, l'échographie est devenue entre-temps un examen standard en cardiologie pédiatrique.

Avant l'avènement de l'échocardiographie, le cathétérisme cardiaque était, mis à part la radiologie, la seule méthode permettant d'examiner le système cardiovasculaire. Le cathétérisme cardiaque est, contrairement à l'échocardiographie, une intervention invasive et qui expose au rayonnement. Les appareils d'échographie modernes sont des unités mobiles, employées lors d'une consultation, aux soins intensifs ou en salle d'opération et disposent, selon les besoins, de différentes sondes (échographie fœtale, trans-œsophagienne, etc.). Des directives bien établies régissent l'échocardiographie en fonction des différentes indications¹⁾.

La structure, l'hémodynamique et la fonction du système cardiovasculaire forment, surtout lorsqu'il s'agit de pathologies congénitales, un tout et s'influencent réciproquement. Mais il se peut que, selon la problématique, la fonction, l'anatomie ou alors les anomalies hémodynamiques soient au premier plan. L'objectif de l'échocardiographie moderne est de répondre le mieux possible à ces questions. Et les résultats de ces investigations conditionnent souvent de manière décisive le traitement des maladies cardiovasculaires.

Anatomie

L'établissement de la cardiologie pédiatrique en tant que discipline distincte est fondamen-

talement lié à l'imagerie des malformations du système cardiovasculaire. Depuis le début du 20^{ème} siècle et jusque dans les années 1970 nous ne disposions que de la radiologie ou de l'angiographie, des méthodes engendrant une exposition importante aux rayons X. Au début des années 1970 fut introduite l'échocardiographie, mais les informations structurelles de cette nouvelle technique diagnostique (échocardiographie en mode M) (*fig.1.*) étaient rudimentaires, si bien que le cathétérisme cardiaque restait la méthode de choix pour l'investigation de malformations cardiovasculaires. La représentation en mode M permettait en principe de mesurer uniquement les dimensions des cavités cardiaques et du myocarde et de calculer, à partir de ces données, des paramètres fonctionnels.

La compréhension des malformations cardiaques congénitales exige une représentation segmentaire de l'anatomie et aussi une description des déviations de la norme. Il ne devint possible de générer des images en deux dimensions (*fig. 2 et 3*) et représenter ainsi des malformations cardiaques par des images animées qu'à partir des années 1980. Ce fut la percée de l'échocardiographie, surtout du fait qu'elle pouvait, comparé à d'autres techniques d'imagerie de l'époque (tomogra-

phie computerisée ou résonance magnétique), évaluer, sans irradiation et avec des moyens simples, non seulement des images bidimensionnelles de l'anatomie cardiaque mais aussi les mouvements et la fonction de ces structures. Il devenait donc possible de représenter le positionnement (et donc des anomalies positionnelles) du cœur tout autant que les structures intracardiaques²⁾.

La méthode pouvait maintenant mettre en évidence des signes non-décelables cliniquement ou radiologiquement mais d'importance primordiale pour le patient, p.ex. évaluer les risques d'une cardiopathie familiale (*fig. 3*) ou d'une valve aortique bicuspide (*fig. 4a*). Des pathologies comme la communication interauriculaire qui échappaient au diagnostic en absence de signes cliniques occasionnaient de sévères complications à l'âge adulte, sont ainsi décelées facilement par l'échocardiographie et corrigées précocement.

Pour une représentation tridimensionnelle optimale, l'échocardiographie bidimensionnelle doit être effectuée en plusieurs coupes (p.ex. axes parasternal court et long, coupe apicale 4-cavités, etc.). Ces investigations doivent être effectuées selon des standards de qualité précis, afin de ne pas manquer des pathologies importantes³⁾. L'examineur expérimenté peut ensuite reconstruire en pensée, à travers les différentes coupes et en

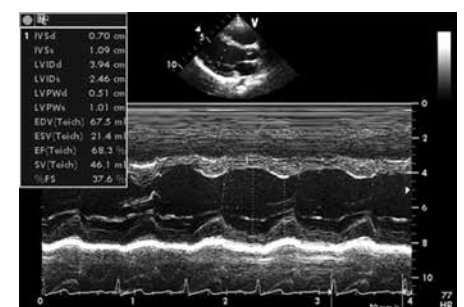


Figure 1: Mode M du ventricule gauche



Figure 2: Résultat normal

Long axe parasternal, RV = ventricule droit, LV = ventricule gauche, Ao = aorte, M = valve mitrale, LA = oreillette gauche, IVS = septum interventriculaire.

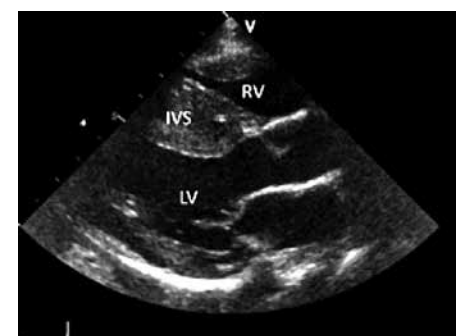


Figure 3: Cardiomyopathie hypertrophique

pivotant la sonde (*sweep*), l'anatomie tridimensionnelle du cœur.

Le développement de l'échocardiographie tridimensionnelle durant la dernière décennie aura été un jalon important dans l'appréciation des structures et tout particulièrement des valves cardiaques (*fig. 4b et 5b*).

La reproduction du cœur, pendant l'examen, en plusieurs coupes devenait donc en partie inutile. En effet on reproduit, avec une échocardiographie en 3D optimale, la totalité du volume cardiaque et on dispose donc d'un nombre infini de plans pouvant être analysés à posteriori (*offline*) une fois l'examen du patient terminé⁽⁴⁾. Les progrès techniques des dernières années ont permis de raccourcir le temps d'évaluation de l'importante masse de données recueillies en 3D. Alors que des heures d'interprétation des images 3D étaient nécessaires autrefois, l'anatomie apparaît

aujourd'hui déjà pendant l'échocardiographie sous forme d'image animée et le temps de reconstruction à posteriori est nettement raccourci grâce aux programmes de traitement plus performants. Le grand problème de l'image en 3D était au début la résolution spatiale insuffisante. Avec le développement de têtes de balayage 3D à haute fréquence, la reproduction détaillée du cœur de nouveau-nés ou de petits enfants est devenue possible. Cela concerne notamment la représentation p.ex. des valves atrioventriculaires, des communications interatriales ou des voies efférentes ventriculaires. L'échocardiographie tridimensionnelle permet aussi des images nettement plus plastiques et impressionnantes de pathologies extracardiaques, p.ex. de l'épanchement du péricarde (*fig. 6*).

Les examens plus exigeants par IRM ou CT-scan sont entre-temps réservés aux problé-

matiques intracardiaques complexes et à l'appréciation de vaisseaux sanguins.

Hémodynamique

Outre les représentations bi- et tridimensionnelles des structures cardiaques, la mise en évidence du flux sanguin cardiaque joue un rôle primordial. Lors de l'échographie la sonde émet des ultrasons qui sont reflétés par les structures limites du cœur et la conversion des ultrasons reflétés génère finalement l'image échographique. L'effet Doppler permet d'enregistrer le mouvement des érythrocytes et donc le flux sanguin, les ultrasons étant reflétés par les érythrocytes. On peut diviser la méthode Doppler grossièrement en deux catégories: d'une part le PW (*pulsed-wave*)-Doppler ou le CW (*continuous-wave*)-Doppler, les deux représentés sous forme de profil de Doppler spectral (*fig. 7*). Ils génèrent un profil de flux indiquant la direction et la vitesse du flux sanguin. A partir de la vitesse on peut calculer, selon la formule de Bernoulli, les gradients de pression ($V^2 \times 4 =$ gradient de pression en mmHg), données très importantes p.ex. pour établir l'indication au traitement.

Le Doppler couleur met en évidence le flux sanguin, selon un codage couleur, directement dans les structures de l'image bidimensionnelle. On peut ainsi reconnaître, sous forme de changement de couleur, non seulement des flux accélérés (sténoses vasculaires) mais aussi leur localisation (*fig. 7a et 8*). L'échocardiographie standard comprend la mesure du flux sanguin au passage de toutes les valves (valves atrioventriculaire, pulmonaire et aortique ainsi que de l'artère pulmonaire et de ses ramifications, de l'arc aortique et de l'aorte descendante par Doppler couleur, et la mesure de la vitesse du flux sanguin par PW- ou CW-Doppler. On apprécie en outre le reflux depuis les veines systémiques et pulmonaires⁽⁵⁾. Les pathologies ou problèmes plus spécifiques sont recherchés de manière ciblée (p.ex. shunt par une communication interauriculaire ou interventriculaire, un canal artériel ou des shunts artificiels).

Il est devenu possible par ce moyen simple et non-invasif de se prononcer sur l'hémodynamique, de déterminer l'importance de la sténose ou de l'insuffisance d'une valve (*fig. 9*), la direction d'un shunt intra- ou extracardiaque ou la sévérité d'une hypertension artérielle pulmonaire.

Les exemples d'utilisation du PW- et CW-Doppler et du Doppler couleur dépassent

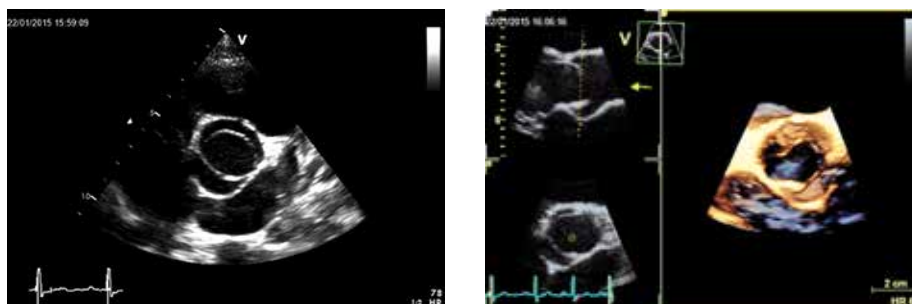


Figure 4a/b: Valve aortique bicuspidienne (échocardiographie 2D et 3D, vue sur la valve)

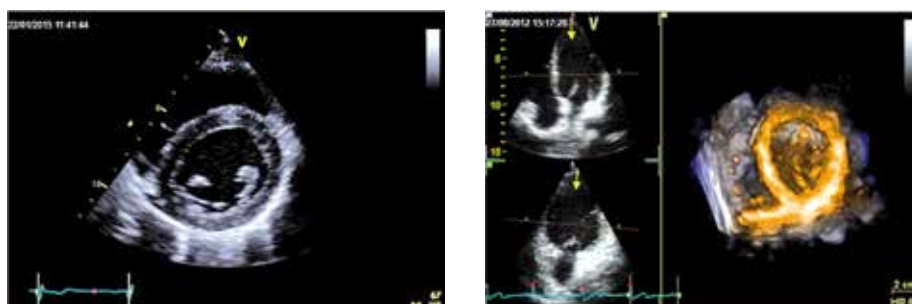


Figure 5a/b: Ventricule gauche et valve mitrale (échocardiographie 2D et 3D)

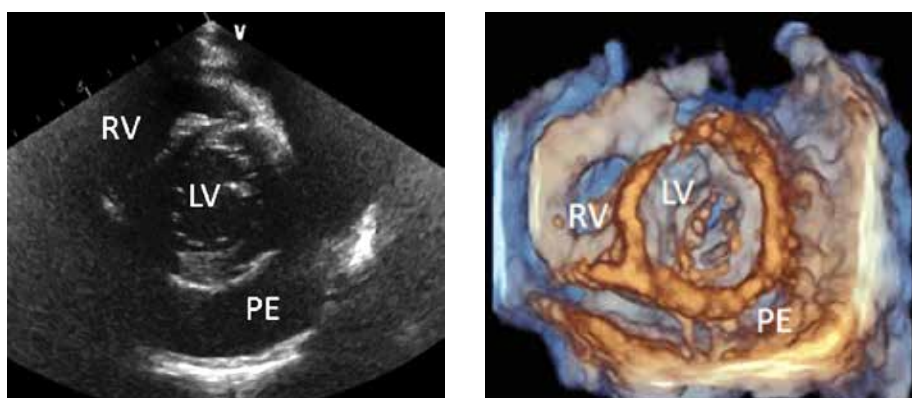


Figure 6a/b: Épanchement péricardique (échocardiographie 2D, axe court parasternal et 3D). RV = ventricule droit, LV = ventricule gauche, PE = épanchement péricardique)

l'étendue de cet article. Néanmoins on peut dire qu'en principe l'échocardiographie ne se limite pas à la reproduction d'une communication interventriculaire (CIV) ou d'une insuffisance aortique (IA). En général le Doppler permet en plus d'apprécier l'importance de l'anomalie constatée, p.ex. la présence d'une hypertension artérielle pulmonaire en cas de CIV; le reflux diastolique dans l'aorte abdominale constaté par Doppler couleur ou PW-Doppler permet de situer l'étendue d'une IA⁶⁾. Les indications à la chirurgie cardio-vasculaire sont aujourd'hui posées, outre sur la base de signes cliniques, au moyen de l'échocardiographie. Il ne s'agit pas seulement des cas sévères, diagnostiqués cliniquement, mais souvent de signes plus subtils qui guident le cardiologue et le chirurgien dans leurs décisions pour le bien-être du patient à long terme. La possibilité de pouvoir diagnostiquer, outre la localisation d'un problème cardiovasculaire aussi ses répercussions hémodynamiques, a eu pour conséquence que, depuis les années 1990, le cathétérisme cardiaque n'est pour ainsi dire plus utilisé à des fins diagnostiques, mais presque exclusivement en tant qu'intervention thérapeutique.

Fonction

L'appréciation de la fonction systolique et diastolique est, en principe, une partie intégrante de toute échocardiographie. Bien que sujettes à des erreurs, ce sont les méthodes décrites jusque là, traditionnelles, comme l'échographie en mode M et bidimensionnelle et les profils Doppler de flux, qu'on utilise usuellement pour répondre à ces questions. De nouvelles techniques développées ces dernières années, comme e.a. le Doppler tissulaire (*tissue doppler imaging*, TDI) ou la «*speckle tracking echocardiography*», peuvent donner un aperçu direct de la fonction myocardique et sont appliquées dans les centres universitaires dans le cadre d'études.

Fonction systolique

On appréciait la fonction systolique des ventricules déjà avant l'apparition de l'échocardiographie en mesurant les variations de volume entre diastole et systole lors du cathétérisme cardiaque. Après l'introduction de l'échocardiographie dans les années 1970 devint possible aussi la mesure de la fraction de raccourcissement du ventricule gauche par l'échocardiographie en mode M (fig. 1). La **fraction de raccourcissement** du ventricule

gauche est calculée au moyen de la relation entre diamètres systolique et diastolique du ventricule, mesurés en mode M⁷⁾. Ce principe est valable aussi pour le calcul de la **fraction d'éjection** à partir des contours endocardiques du ventricule gauche selon Simpson⁸⁾, obtenus non pas en mode M mais par échocardiographie bidimensionnelle.

Le problème des deux méthodes est que les valeurs mesurées sont influencées par le volume et les troubles de la motilité de la paroi cardiaque et l'hypothèse erronée que le ventricule gauche aurait une géométrie bien définie (ellipse). Malgré cela les deux techniques jouent un rôle important pour les examens standard et le suivi des patients.

L'évaluation de la fonction systolique par **l'échocardiographie tridimensionnelle** se

base également sur les variations de volume lors du cycle cardiaque – par contre ces valeurs sont effectivement mesurées et sont donc nettement plus fiables. Il s'est par ailleurs avéré que la fraction d'éjection calculée au moyen de l'échocardiographie tridimensionnelle corrèle nettement mieux avec les mesures beaucoup moins simples faites par IRM⁹⁾ que les mesures faites avec l'échocardiographie bidimensionnelle.

Outre l'évaluation de la fonction de pompe globale du ventricule (fractions de raccourcissement et d'éjection), la fonction systolique peut être décrite, avec des moyens modernes, par la contractilité des fibres myocardiques de différents segments ventriculaires et auriculaires. Les mouvements de ces segments peuvent être mesurés avec le Doppler tissu-

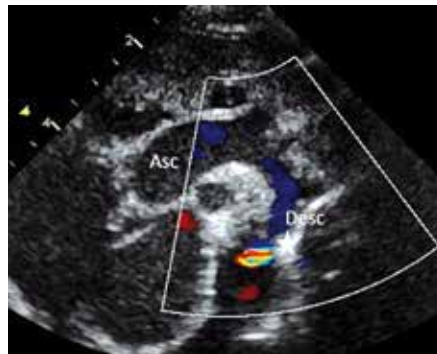


Figure 7a: Coarctation de l'aorte (Doppler couleur 2D, Asc = aorte ascendante, desc = aorte descendante, l'étoile indique la sténose).

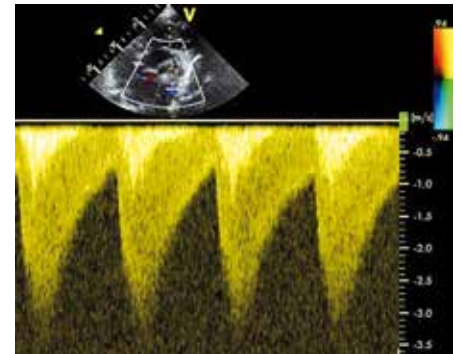


Figure 7b: CW-Doppler (profil de flux en dent de scie)

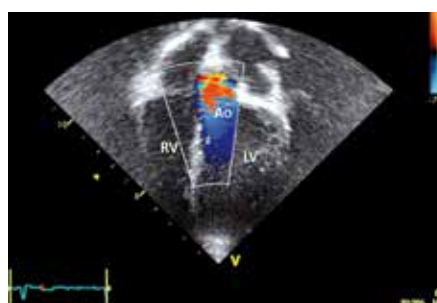


Figure 8: Sténose aortique (Doppler couleur 2D, coupe 4-cavités, RV = ventricule droit, LV = ventricule gauche, Ao = aorte)

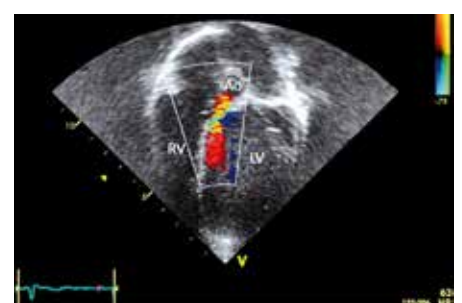


Figure 9: Insuffisance aortique (Doppler couleur 2D, coupe 4-cavités, RV = ventricule droit, LV = ventricule gauche, Ao = aorte)

Indications à l'examen Doppler

- Sténoses et insuffisances valvulaires
- Obstructions vasculaires (Localisation et gradient de pression)
- Gradient de pression dans des shunts vasculaires naturels ou artificiels
- Localisation de communications interatriales et interventriculaires
- Gradient de pression d'une communication interventriculaire
- Gradient de pression d'une insuffisance valvulaire (mesure de l'hypertension artérielle pulmonaire)
- Mesure du volume du shunt d'une communication interventriculaire
- Trouble fonctionnel diastolique (PW-Doppler des veines pulmonaires et de la valve mitrale)

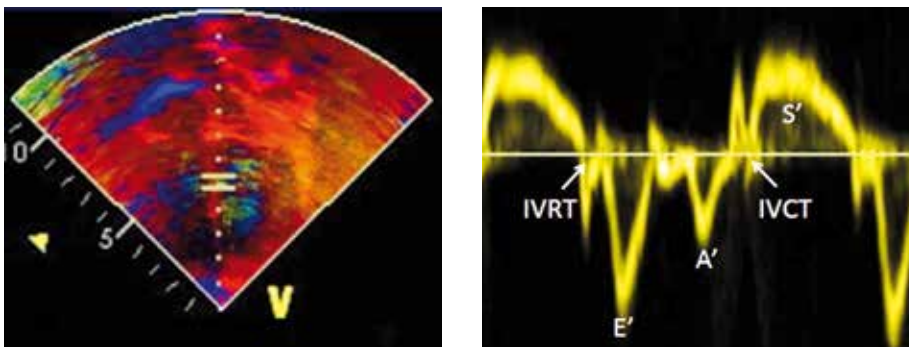


Figure 10: TDI. À gauche: Doppler tissulaire à codage couleur, à droite reproduction spectrale: S' = onde systolique antégrade; E' = remplissage passif du ventricule gauche, A' = contraction de l'oreillette, IVRT = *isovolumic relaxation time*, IVCT = *isovolumic contraction time*

laire (*tissue doppler imaging*, TDI)¹⁰⁾, qui mesure les mouvements de parties du myocarde (fig. 10).

Les valeurs mesurées étant dépendantes de l'angle du faisceau Doppler, le TDI se prête en première ligne pour la mesure du mouvement dans l'axe cardiaque long (donc depuis la base du cœur vers la pointe).

La *speckle tracking echography* a été une avancée importante pour l'appréciation de la fonction myocardique.

La technique base sur le principe que le mouvement de petits signaux acoustiques générés par des segments du myocarde peuvent être suivis avec l'ultrason dans n'importe quelle direction¹¹⁾. La méthode est indépendante du volume et de la géométrie du ventricule (notamment du ventricule droit) et mesure la déformation (*strain*) de segments bien définis du myocarde (fig. 11) ainsi que la modification de la déformation dans le temps (*strain rate*). Normalement le mouvement est mesuré dans l'axe long (*strain* longitudinal), il est néanmoins possible de préciser dans l'axe court la rotation (*strain* circonférentiel) et l'épaississement du myocarde (*strain* radial) (fig. 12).

Le progrès le plus important apporté par ces nouveaux paramètres est de permettre un aperçu de troubles fonctionnels infra-cliniques de régions délimitées du myocarde, avant que la dysfonction systolique ne se généralise. De ce fait la *speckle tracking echography* est une méthode prometteuse permettant de détecter notamment des troubles subtils et réversibles de la fonction myocardique (p.ex. chimiothérapie cardiotoxique, hypertension artérielle néphrogène [Navarini et al. manuscrit en préparation]). Normalement la *speckle tracking echography* est pratiquée dans le cadre d'étapes standardisées de l'échocardiographie bidimensionnelle (vues apicale long-axe, apicale 2-chambres, apicale 4-chambres, parasternale court-axe), afin de visualiser tous les segments cardiaques, ce qui est très chronophage. La technique la plus récente, l'échocardiographie tridimensionnelle est actuellement en mesure de mettre en évidence ces différentes informations par un unique set de données (*full volume*) et de les quantifier ensuite *offline* (fig. 13).

En raison de la géométrie complexe du ventricule droit, sa fonction systolique ne peut être calculée aussi facilement que celle du ventricule gauche avec la méthode en mode M ou la fraction d'éjection de la méthode bidimensionnelle. Les méthodes modernes, comme

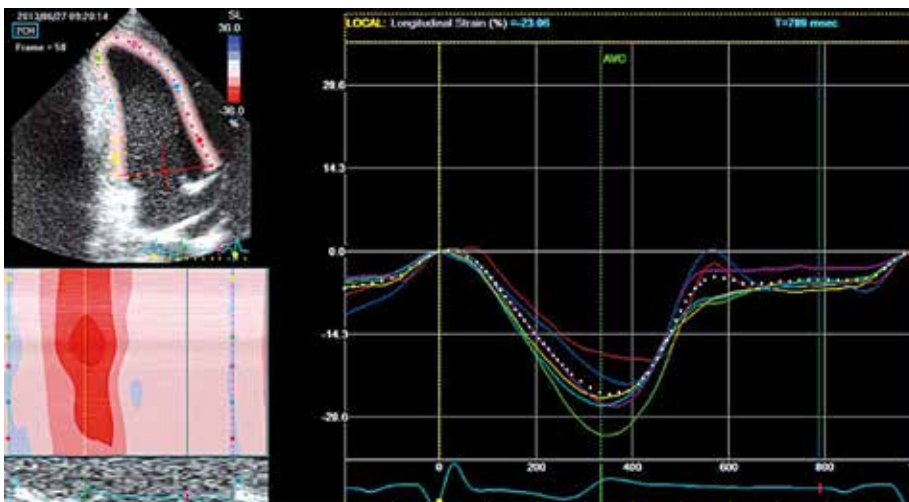


Figure 11: *Strain* longitudinal (*speckle tracking*, ventricule gauche, vue apicale 2-cavités: les différents segments sont représentés dans des couleurs différentes; à droite: déviation négative de tous les segments, exprimant le raccourcissement dans l'axe long pendant la systole; à gauche en bas codage couleur, rouge = raccourcissement).

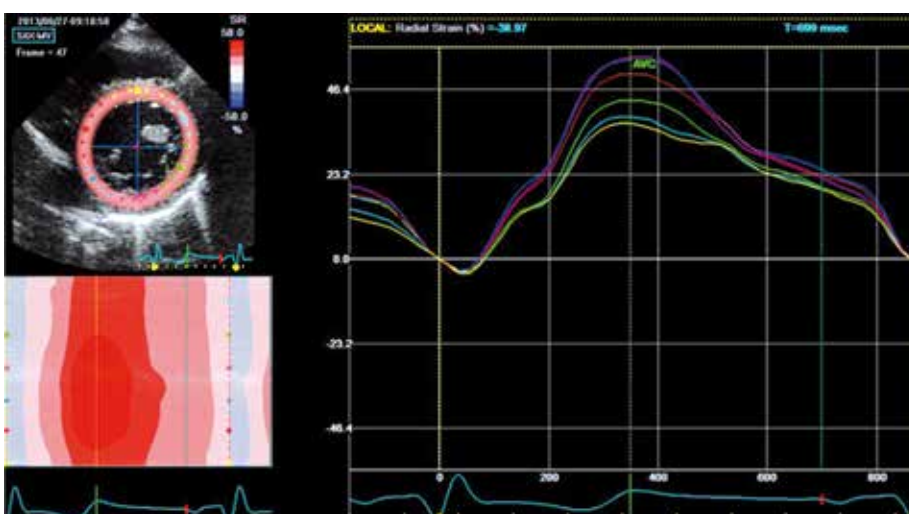


Figure 12: *Strain* radial (*speckle tracking*, ventricule gauche axe court: les différents segments sont représentés dans des couleurs différentes; à droite: déviation positive de tous les segments, exprimant l'épaississement pendant la systole).

l'échocardiographie tridimensionnelle ou la *speckle tracking*, qui ne dépendent pas de prémisses géométriques, sont alors plus fiables et reproductibles (fig. 14).

Cette échocardiographie *speckle tracking* se prête en outre pour la mise en évidence de la synchronicité de la contraction de différents segments du cœur normal (fig. 15) comme en présence de malformations cardiaques complexes (fig. 16).

Fonction diastolique

La diastole joue un rôle important dans l'hémodynamique de nombreuses maladies, l'analyse échocardiographique de la fonction diastolique est donc tout aussi importante que la systolique. Souvent le trouble systolique n'est que le résultat d'une dysfonction diastolique. La fonction diastolique est plus difficile à évaluer par l'échocardiographie que la systolique, notamment parce qu'elle se compose de plusieurs éléments: la phase isovolumétrique ou de remplissage du ventricule après l'ouverture des valves atrioventriculaires, l'expansion passive due à l'élasticité (compliance) du myocarde et finalement la contraction de l'oreillette. La fonction

diastolique était traditionnellement évaluée au moyen d'une part de la **vitesse du flux Doppler** pendant la diastole précoce (onde E) et la contraction atriale (onde A), d'autre part du temps isovolumétrique (p.ex. fermeture de la valve aortique jusqu'à l'ouverture de la valve mitrale) et de profils de flux Doppler au passage des valves atrioventriculaires et des veines pulmonaires¹².

En complément a été développé ces dernières années le Doppler tissulaire (**tissue doppler imaging**, TDI) qui mesure la vitesse de la contraction myocardique dans la partie latérale et médiale de l'anneau mitral et latérale de l'anneau tricuspide (fig. 10). La vitesse diastolique précoce de l'anneau valvulaire (onde E') reflète la relaxation active du ventricule après l'ouverture de la valve mitrale resp. tricuspide; la relation entre la vitesse du flux sanguin et celle de l'anneau valvulaire (rapport E/E') corrèle avec la pression de remplissage du ventricule.

Ces méthodes nous permettent une appréciation des mouvements du myocarde et s'avèrent être un paramètre très sensible pour la détection d'atteintes infra-cliniques du myocarde lors de certaines pathologies (p.ex. cardiotoxicité d'une chimiothérapie, maladie de Kawasaki)¹³. Outre ces mesures de la vitesse dans l'axe longitudinal, il est maintenant possible de mettre en évidence le mouvement de rotation du ventricule gauche. La disposition de ses fibres musculaires conditionne, pendant la systole, un mouvement de rotation de la base (donc du plan des valves atrioventriculaires) dans un sens et de la pointe dans le sens contraire¹⁴. Il en résulte un mouvement «d'essorage» (*twist*), à partir duquel est calculée la torsion du ventricule gauche. Pendant la diastole, cette énergie accumulée est libérée avec la relaxation (*untwisting*) du ventricule, favorisant le flux sanguin depuis l'oreillette dans le ventricule. Ce mouvement de rotation ne peut être mesuré que de manière limitée avec le Doppler tissulaire, le faisceau d'ultrasons devant être dirigé de façon optimale sur le segment à mesurer. Pour la mesure de la fonction diastolique on utilise donc de plus en plus l'échocardiographie *speckle tracking*, qui ne dépend pas de l'angle du faisceau Doppler et qui mesure simultanément plusieurs paramètres (*twist*, *torsion*, *torsion rate*, etc.)

Autres paramètres fonctionnels

La *tricuspid annular plane systolic excursion* (TAPSE) est un paramètre très simple mesuré en mode M, ayant une très bonne corrélation avec la fonction systolique du ventricule droit,

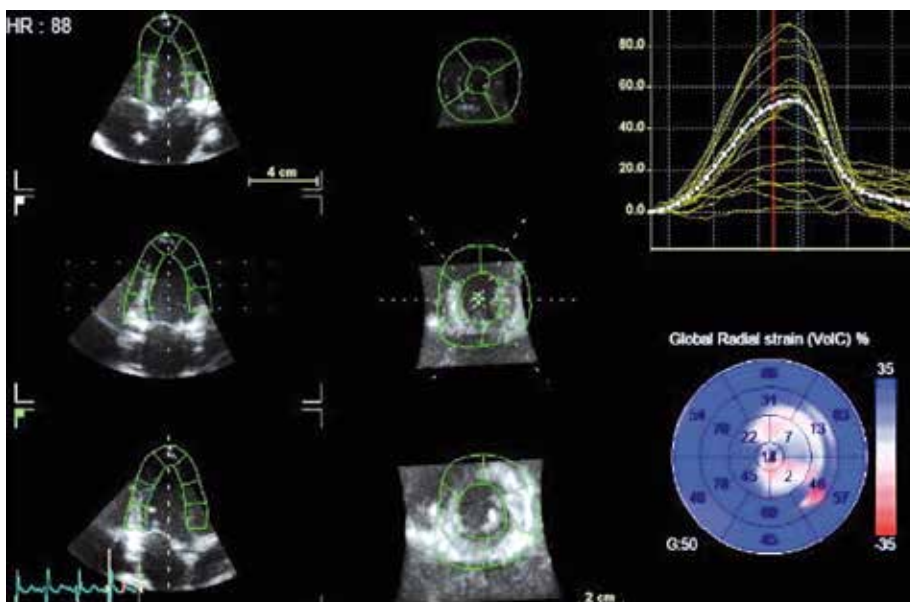


Figure 13: Strain radial (3D-speckle tracking, ventricule gauche: déviation positive de tous les segments, exprimant l'épaississement pendant la systole et représentation «bull's eye»).

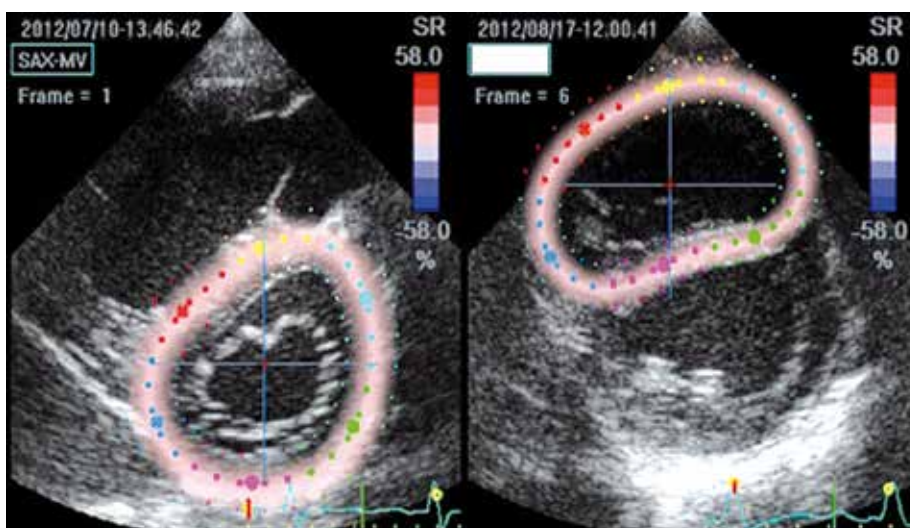


Figure 14: Strain radial (*speckle tracking*, ventricule gauche et droit axe court: les différents segments sont représentés dans des couleurs différentes).

faisant actuellement partie des examens de routine¹⁵⁾ et pour lequel existent des valeurs normales.

Le **Tei-Index** ou *myocardial performance index* (MPI) permet une appréciation globale de la fonction ventriculaire¹⁶⁾. Le MPI est indépendant de la géométrie du ventricule et peut être calculé facilement à partir du Doppler tissulaire (temps de contraction isovolumétrique + temps de relaxation isovolumétrique divisé par le temps d'éjection).

Les auteurs sont à votre disposition pour des informations et références concernant d'autres paramètres qui ne sont pas présentés ici pour des raisons de place.

Résumé

L'échocardiographie a fait d'énormes progrès pendant ces dernières quatre décennies. Actuellement le cœur entier peut être scanné en un temps relativement court au moyen de

l'échocardiographie tridimensionnelle. Néanmoins ces méthodes exigent des connaissances techniques et une formation appropriées de l'examineur et sont actuellement employées dans les grands centres de cardiologie pédiatrique lors d'examens et interventions préopératoires. Pour les questions de routine l'échocardiographie bidimensionnelle, complétée par les examens Doppler, reste la méthode la plus utilisée et est, vu son excellente résolution spatiale et temporelle, amplement suffisante. L'analyse de la fonction cardiaque enregistre actuellement un changement de paradigme suite à la possibilité d'examiner des segments isolés du myocarde au moyen de l'échocardiographie *speckle tracking*. L'objectif étant de ne pas diagnostiquer une dysfonction myocardique à un stade avancé (fraction de raccourcissement pathologique) mais de reconnaître des signes précliniques fins. En profitent les patients avec un problème cardiaque potentiellement réversible p.ex. après chimiothérapie cardiotoxique ou souffrant d'une hypertension artérielle néphrogène. Nous conseillons donc d'adresser les patients qui pourraient profiter du diagnostic précoce d'une dysfonction subtile du myocarde, pour des contrôles réguliers à un centre qui offre la technique du *speckle tracking*.

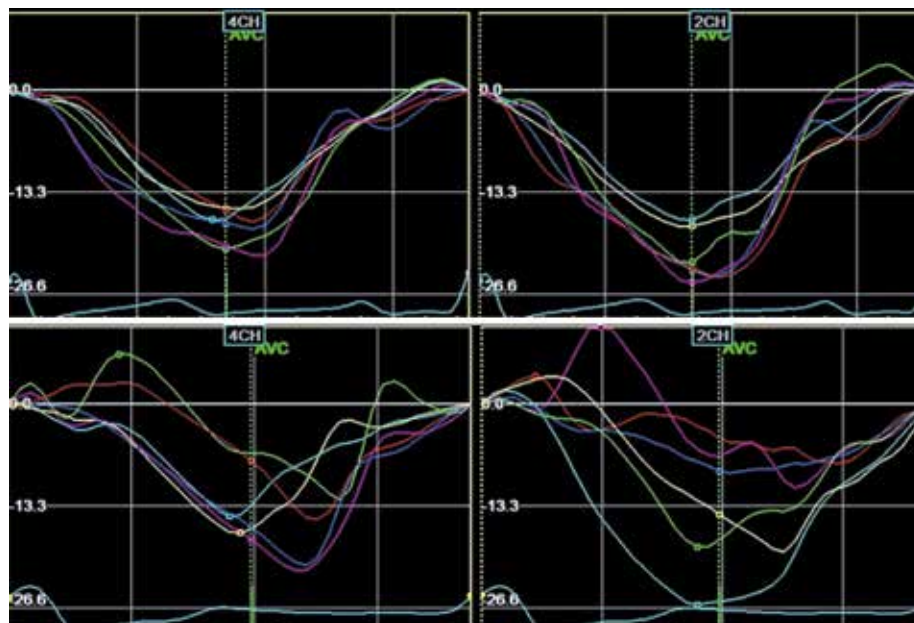


Figure 15: Strain longitudinal (*speckle tracking*, ventricule gauche vue apicale 2- et 4-cavités: les différents segments sont représentés dans des couleurs différentes; en haut: mouvement resp. raccourcissement en grande partie synchrone des segments; en bas: mouvement dyssynchrone des segments).

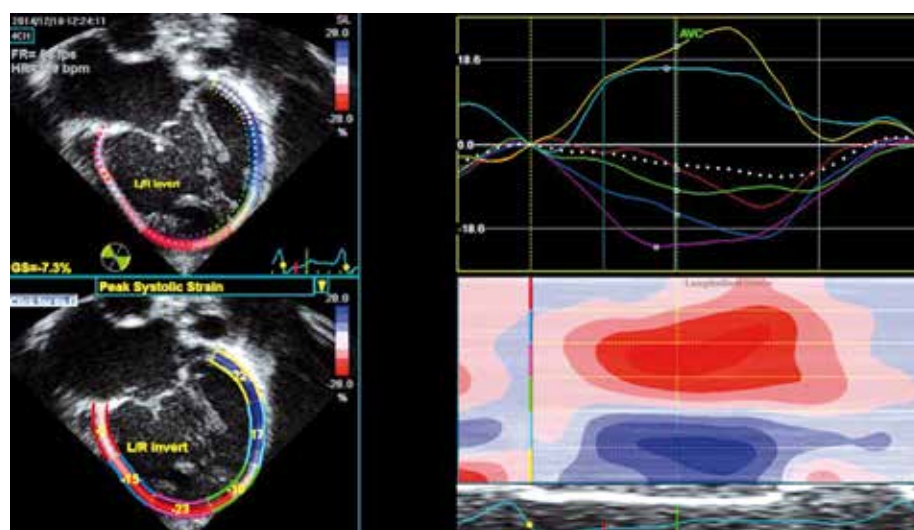


Figure 16: Strain longitudinal, syndrome d'hypoplasie du cœur gauche (*speckle tracking*, ventricule droit et gauche vue apicale 4-cavités: les différents segments sont représentés dans des couleurs différentes; à droite: mouvement dyssynchrone prononcé des segments ventriculaires droits par rapport aux segments ventriculaires gauches; en haut courbes, en bas codage couleur, bleu = allongement, rouge = raccourcissement).

Références

- 1) Lai WW, Geva T, Shirali GS, Frommelt PC, Humes RA, Brook MM, Pignatelli RH, Rychik J. Guidelines and Standards for Performance of Pediatric Echocardiogram: a report from the Task Force of the Pediatric Council of the American Society of Echocardiography. *J Am Soc Echocardiogr* 2006; 19: 1413-30
- 2) Feigenbaum H. Evolution of echocardiography. *Circulation* 1996; 93: 1321-7
- 3) Lopez L, Colan SD, Frommelt PC, Ensing GJ, Kendall K, Younoszai AK, Lai WW, Geva T. Recommendations for quantification methods during the performance of a pediatric echocardiogram: a report from the Pediatric Measurements Writing Group of the American Society of Echocardiography Pediatric and Congenital Heart Disease Council. *J Am Soc Echocardiogr* 2010; 23: 465-95
- 4) Qin JX et al. The development of real time three-dimensional echocardiography is ideally suited for assessment of LV size and function and compares very well to cardiac MRI: validation of real time three dimensional echocardiography for quantifying left ventricular volumes in the presence of a left ventricular aneurysm: in vitro and in vivo studies. *J Am Coll Cardiol* 2000; 36: 900-7
- 5) Quinones MA, Otto CM, Stoddard M et al. Recommendations for quantification of Doppler echocardiography: a report from the Doppler Quantification Task Force of the Nomenclature and Standards Committee of the American Society of Echocardiography. *J Am Soc Echocardiogr* 2002; 15: 167-84
- 6) Zoghbi WA, Enriquez-Sarano M, Foster E, Grayburn PA, Kraft CD, Levine RA et al. American Society of Echocardiography. Recommendations for evaluation of the severity of native valvular regurgitation with two-dimensional and Doppler echocardiography. *J Am Soc Echocardiogr* 2003; 16: 777-802

- 7) Sahn DJ, DeMaria A, Kisslo J, Weyman A. Recommendations regarding quantitation in M-mode echocardiography: results of a survey of echocardiographic measurements. *Circulation* 1978; 58: 1072-83
- 8) Schiller NB et al. Left ventricular volume from paired biplane two-dimensional echocardiography. *Circulation* 1979; 60: 547-55
- 9) Pouleur AC, le Polain de Waroux JB, Pasquet A et al. Assessment of left ventricular mass and volumes by three-dimensional echocardiography in patients with or without wall motion abnormalities: comparison against cine magnetic resonance imaging. *Heart (British Cardiac Society)* 2008; 94: 1050-7
- 10) Yu CM, Sanderson JE, Marwick TH et al. Tissue Doppler imaging: a new prognosticator for cardiovascular diseases. *J Am Coll Cardiol* 2007; 49: 1903-14
- 11) Lorch SM, Ludomirsky A, Singh GK. Maturational and growth-related changes in left ventricular longitudinal strain and strain rate measured by two-dimensional speckle tracking echocardiography in healthy pediatric population. *J Am Soc Echocardiogr* 2008; 21: 1207-15
- 12) Khouri SJ, Maly GT, Suh DD, Walsh TE. A practical approach to the echocardiographic evaluation of diastolic function. *J Am Soc Echocardiogr* 2004; 17: 290-7
- 13) Ganame J, Claus P, Eyskens B et al. Acute cardiac functional and morphological changes after anthracycline infusions in children. *Am J Cardiol* 2007; 99: 974-7
- 14) Sengupta PP, Tajik AJ, Chandrasekaran K et al. Twist mechanics of the left ventricle: principles and application. *JACC Cardiovasc Imaging* 2008; 1: 366-76
- 15) Gupta S, Khan F, Shapiro M, Weeks SG, Litwin SE, Michaels AD. The associations between tricuspid annular plane systolic excursion (TAPSE), ventricular dyssynchrony, and ventricular interaction in heart failure patients. *Eur J Echocardiogr* 2008; 9: 766-71
- 16) Eidem BW, O'Leary PW, Tei C, Seward JB. Usefulness of the myocardial performance index for assessing right ventricular function in congenital heart disease. *Am J Cardiol* 2000; 86: 654-8

Correspondance

mladen.pavlovic@insel.ch

Les auteurs certifient qu'aucun soutien financier ou autre conflit d'intérêt n'est lié à cet article.