

Imagerie multimodalité des cardiopathies congénitales en salle de cathétérisme

Multimodality Imaging of Congenital Heart Diseases in the Catheterization Laboratory

S Hascoët [1], K Hadeed [2], K Warin-Fresse [3], MA Isorni [1], A Potier [1], M Kloeckner [1], J Guilhaire [1], P Maury [2], C Karsenty [2], G Duthoit [4], J Petit [1], M Mostefa-Kara [1], P Guérin [3], P Acar [2], S Haulon [1], D Fabre [1]

1. M3C Marie-Lannelongue Hospital - Department of paediatric and congenital cardiac surgery - Paris-Sud University, Paris.
2. M3C CHU Toulouse - Paediatric and congenital cardiology - Children's Hospital - Paul Sabatier University - Toulouse.
3. M3C CHU Nantes Nord Laennec Hospital - Nantes.
4. Hôpital Pitié-Salpêtrière, Paris.

Résumé

Le cathétérisme cardiaque a contribué aux progrès réalisés dans la prise en charge des cardiopathies congénitales. Il permet entre autres l'occlusion de shunt, la dilatation de valves, vaisseaux ou conduits sténosés et le remplacement valvulaire percutané. Une imagerie de précision est nécessaire en salle de cathétérisme pour guider ces interventions qualifiées de « chirurgie par l'image ». La fluoroscopie est utilisée en première intention. L'échocardiographie a été introduite pour guider les procédures intracardiaques. Le scanner et l'imagerie par résonance magnétique sont utilisés pour préparer les procédures. Ces données peuvent servir à imprimer des modèles tridimensionnels. Ces différentes techniques d'imagerie peuvent être fusionnées. Dans cette revue générale, nous décrivons l'évolution des différents outils d'imagerie actuellement utilisés en salle de cathétérisme et les perspectives.

Mots clés

- ◆ Cardiopathies congénitales
- ◆ Cardiologie pédiatrique
- ◆ Imagerie de fusion
- ◆ Echocardiographie 3D
- ◆ Echonavigator
- ◆ Impression 3D

Abstract

Cardiac catheterization has contributed to the progresses made in the management of congenital heart diseases (CHD). Many procedures are feasible, from intracardiac shunts closure to trans-catheter valve replacement. An accurate imaging is mandatory to guide these procedures. Fluoroscopy is used first. Echocardiography is useful to guide intra-cardiac procedures. Myocardial resonance imaging and cardiac tomography scan are used to prepare procedures. Three-dimensional models can be reconstructed and printed from these datasets. Fusion imaging offers the opportunity to merge different imaging modalities. We aimed in this comprehensive review to provide an overview of the evolution of cardiac imaging tools used in catheterization laboratory for CHD.

Keywords

- ◆ Congenital Heart Diseases
- ◆ Paediatric Cardiology
- ◆ Fusion imaging
- ◆ 3D Echocardiography
- ◆ Echonavigator
- ◆ 3D Printing

Le cathétérisme cardiaque a contribué aux progrès réalisés dans la prise en charge des cardiopathies congénitales (1). Il permet notamment l'occlusion de shunts, (2) la dilatation de valves, vaisseaux ou conduits sténosés (3) et le remplacement valvulaire percutané (3,4). Le traitement interventionnel endovasculaire des arythmies compliquant l'évolution des cardiopathies congénitales s'est développé parallèlement (5-7). Une imagerie de précision est nécessaire en salle de cathétérisme et d'électrophysiologie pour guider ces interventions (8). De ce fait, cette spécialité est aussi qualifiée de « chirurgie guidée par l'image ». La fluoroscopie est utilisée en première intention. L'échocardiographie bi et tridimensionnelle a été introduite pour guider les procédures intra-cardiaques (2, 8). Des cartographies tridimensionnelles de l'activation électrique sont utilisées en électrophysiologie (5,6,9). Ces différentes techniques ont chacune leurs avantages et inconvénients et sont complémentaires. De ce fait, la fusion de ces différentes techniques d'imagerie est particulièrement intéressante (8,10-12). Dans cette revue thématique, nous décrivons l'évolution des différents outils d'imagerie actuellement utilisés en salle de cathétérisme des cardiopathies congénitales et les perspectives.

Correspondance

Dr Sébastien Hascoët

Service de cardiologie pédiatrique - Hôpital Marie Lannelongue - 133, av de la Résistance - 92350 Le Plessis-Robinson.
Tel : +33 (0) 1 40 94 28 00 - E-mail : s.hascoet@ccml.fr

Imagerie cardiaque : rôle en salle de cathétérisme

L'imagerie en salle de cathétérisme des cardiopathies congénitales doit offrir une vision précise des lésions et des structures avoisinantes en temps réel pour permettre le geste thérapeutique endovasculaire. C'est ainsi que le concept de chirurgie guidée par l'image a été proposé. Une vision nette des dispositifs médicaux implantables ainsi que des systèmes de déploiement est requise pour assurer la précision du geste thérapeutique. La résolution temporelle doit être excellente pour permettre la synchronisation entre l'œil de l'opérateur et sa main au moment du positionnement du dispositif médical implantable dans la zone cible.

Fluoroscopie

« **Cardiac catheterization: the key in the lock** ». Le premier cathétérisme cardiaque a été réalisé en 1929 par Werner Forrsmann. À l'âge de 25 ans, durant son apprentissage de la chirurgie cardiaque, Werner Forrsmann (1904-1979) passa un cathéter urétral dans sa veine cubitale dénudée et l'achemina jusqu'à l'oreillette droite. Il fit ensuite tirer un cliché radiologique pour le prouver. Avec Cournand et Richards, ils obtinrent le prix Nobel en 1956. Durant sa lecture, Cournand rappela élégamment l'importance de cette découverte qui fut la « clé pour ouvrir la serrure » verrouillant l'accès à la compréhension de la physiologie cardiaque. D'abord diagnostique, le cathétérisme cardiaque devint rapidement thérapeutique, guidé par la fluoroscopie avec la dilatation percutanée de sténose valvulaire pulmonaire (1953) et l'atrioseptostomie de Rashkind (1966) (1).

La fluoroscopie est la pierre angulaire de l'imagerie en salle de cathétérisme. La cadence image est excellente. La visualisation des dispositifs médicaux est bonne. L'utilisation en pratique courante est aisée. La fluoroscopie est suffisante pour réaliser la quasi-totalité des interventions percutanées. La fluoroscopie a évolué avec désormais une technologie numérisée. Des capteurs biplans permettent de travailler en 2 incidences de façon simultanée ou alternativement. L'angiographie numérisée avec soustraction permet d'améliorer la visualisation des structures opacifiées. L'angiographie rotationnelle permet d'obtenir un volume 3D qui après segmentation peut par la suite être fusionné avec la fluoroscopie (13,14). Cette fusion n'est toutefois pas en temps réel et le volume fusionné est figé.

Le talon d'Achille de la fluoroscopie est l'irradiation (15). Les effets déterministes à court terme sont proportionnels à la dose absorbée et très rare avec les doses effectives rapportées en pratique courante (2 à 12 mSv (16)). Ce sont surtout les effets aléatoires stochastiques et le risque carcinologique à long terme qui sont préoccupants chez l'enfant. Il n'y a pas de dose seuil de sécurité démontrée. Le principe premier de radioprotection est donc d'utiliser la plus petite dose d'irradiation nécessaire ainsi que des alternatives d'imagerie non irradiantes quand elles sont accessibles.

De plus, la fluoroscopie ne permet pas une bonne visualisation des structures intracardiaques, en particulier des défauts congénitaux. De ce fait l'apport de nouvelles techniques d'imagerie complémentaires, en particulier l'échocardiographie, s'est révélé essentiel pour le développement du cathétérisme interventionnel.

Echocardiographie 2D et 3D

L'échocardiographie 2D et 3D est une imagerie de haute résolution temporelle et de bonne définition, en particulier pour les structures intracardiaques. Il s'agit désormais d'un outil multi-modalités et l'échographiste interventionnel navigue entre les vues en coupe 2D et multiplans et les vues volumiques 3D (2). L'échocardiographie offre une bonne vision des communications interatriales ou interventriculaires et des dispositifs d'occlusion. L'échographie permet de guider les gestes de plasties valvulaires complexes (plastie mitrale percutanée, correction de fuite paraprothétique valvulaire). L'échocardiographie en salle de cathétérisme est réalisable par voie transthoracique, par voie transoesophagienne et par voie endovasculaire intracardiaque. Néanmoins chaque option a des limites. L'échographie transthoracique est non invasive et permet de guider efficacement les procédures d'occlusions de shunts intracardiaques (CIA, CIV). L'échocardiographie transthoracique est néanmoins utilisée en alternance avec la fluoroscopie (sonde et main de l'opérateur apparaissant dans le champ de fluoroscopie). L'échographie transoesophagienne expose à un risque rare mais grave de lésions œsophagiennes. Les sondes d'échographie transoesophagienne ont été miniaturisées pour limiter ce risque et permettre l'utilisation chez les nourrissons (17). À l'heure actuelle, la technologie 3D n'est cependant pas disponible dans les sondes utilisées chez les enfants de moins de 20 kgs (18). Enfin l'inconfort lié à la voie transoesophagienne nécessite le recours à l'anesthésie générale avec intubation oro-trachéale, ce qui complexifie le geste. L'échographie endocavitaire n'a pas ces inconvénients mais nécessite une 2^{ème} voie d'abord (19). Le surcoût lié à la sonde d'usage unique limite son utilisation en pratique courante. Alors que l'échographie transthoracique en salle de cathétérisme peut être réalisée avant, pendant et après le geste par le cathétériseur, l'échographie transoesophagienne nécessite le recours à un deuxième opérateur.

Une formation spécifique de cet échographiste interventionnel est nécessaire pour qu'il soit en mesure de comprendre les éléments clés à visualiser. Une attention particulière doit être portée à la radioprotection de cet opérateur situé le plus souvent à proximité des tubes à rayons X. Les images sont relayées en temps réel pour le cathétériseur sur le pavé monodalle.

L'échocardiographie peut-elle remplacer la fluoroscopie ?

L'atrioseptostomie de Rashkind est souvent guidée par échocardiographie seule en salle de naissance chez les nouveau-nés avec transposition des gros vaisseaux. Cette application illustre que certains cathétérismes peuvent être guidés seulement par échocardiographie sans recourir à la fluoroscopie. Néanmoins, dans cette indication, ce choix est lié à l'urgence médicale plutôt que par une volonté de radioprotection. Certaines équipes ont néanmoins tenté d'appliquer ce concept pour d'autres procédures. Ainsi, des fermetures de communications interatriales ont été réalisées sous échocardiographie seule (20). Néanmoins, par échocardiographie, la visualisation du guide dans la distalité de la veine pulmonaire supérieure gauche est limitée et expose à un risque traumatique difficilement acceptable. Par les opérateurs expérimentés, la fermeture de CIA est réalisée en quelques minutes de scopie seulement et à basse cadence image limitant l'irradiation.

L'impact de cette faible dose d'irradiation reste à démontrer (21). La fermeture percutanée de canal artériel persistant est pratiquée en routine guidée seulement par la fluoroscopie. Néanmoins, la fermeture percutanée des canaux de prématurés

s'est développée récemment en alternative à la ligature chirurgicale. Le guidage échocardiographique dans cette indication particulière est utilisé en première intention. La visualisation de la prothèse dédiée (Amplatzer duct occluder 2 AS) est meilleure. L'injection de produit de contraste est déconseillée du fait de la fragilité rénale et des désordres hydro-électrolytiques potentiels.

Enfin, certains actes de cathétérisme (dilatation valvulaire aortique) sont parfois réalisés chez le fœtus dans des indications exceptionnelles. Du fait de la position aléatoire du fœtus, et de sa radiosensibilité, le guidage de ces procédures est réalisé uniquement par échocardiographie maternelle abdominale.

Fusion d'image échocardiographique et fluoroscopique : logiciel Echonavigator®

Les images proposées par l'échocardiographie transoesophagienne 2D et 3D peuvent être fusionnées avec la fluoroscopie en temps réel (Fig 1). L'extrémité de la sonde d'ETO qui apparaît dans le champ de fluoroscopie sert de repère spatial commun pour positionner les données des 2 techniques dans le même système de coordonnées. Le repérage (« tracking ») de la position de la sonde d'ETO est automatique. Dès que ce repérage est réalisé, la fusion d'image est instantanée et automatisée. Un pavé monodalle permet de choisir la configuration de présentation des images. Le cathétériseur peut voir simultanément :

- une vue en fluoroscopie traditionnelle ;
- la même vue avec fluoroscopie et l'échographie fusionnée ;
- une vue échographique seule dans la même incidence que la fluoroscopie ;
- une vue échographique libre proposée par l'échographiste interventionnel.

La fusion d'image peut être 2D, biplan ou 3D. Une autre particularité est le suivi automatique des mouvements de l'arceau de scopie. La fusion d'image est présentée et synchronisée automatiquement avec l'incidence de la fluoroscopie. Le logiciel Echonavigator permet en outre à l'échographiste de positionner des marqueurs d'intérêts qui seront visibles directement sur la fluoroscopie. Par exemple, l'échographiste peut positionner un point d'intérêt sur une communication interventriculaire. Ce point va apparaître en fluoroscopie et guider le geste interventionnel.

Les limites actuelles de cette technologie récente sont : la nécessité d'un équipement intégral Philips® (salle de cathétérisme, échographe, logiciel) et la nécessité de recours à l'échocardiographie transoesophagienne avec sonde matricielle 3D (patients de plus de 20 kgs). Les applications actuelles concernent essentiellement la cardiologie structurale (fermeture d'auricule, Mitraclip, fermeture de fuite paravalvulaire, ponction transseptale) (10,22). Les applications potentielles en cardiologie congénitale sont nombreuses, en particulier les fermetures percutanées de shunt intracardiaque complexes, les valvulotomies tricuspidales et mitrales, la fermeture ou ouverture de shunt sur un montage de dérivation cavo-pulmonaire). La faisabilité de l'utilisation de cet outil chez les patients avec cardiopathie congénitale a été démontrée. Dans plus de 2/3 des procédures guidées ainsi, les opérateurs ont estimé que cet outil a été utile (12).

Tomodensitométrie

Le scanner cardiaque est une imagerie en coupe avec d'excellentes résolutions spatiale et temporelle. Le scanner est utilisé en amont des procédures pour préparer les gestes percutanés complexes. Avant une revalvulation pulmonaire percutanée par exemple, le scanner cardiaque permet de repérer la proximité des coronaires avec la voie d'éjection droite à aborder. Ainsi, le risque potentiel de compression coronaire peut être anticipé. Le diagnostic définitif repose néanmoins toujours sur le test de compression coronaire au ballon dans la voie droite.

Modélisation tridimensionnelle

Basés sur les données tridimensionnelles tomodensitométriques, des logiciels de reconstruction 3D ont été développés et appliqués au cathétérisme. Par exemple, le logiciel 3mensio® est utilisé pour analyser la morphologie et les dimensions de la valve aortique avant remplacement valvulaire aortique percutané ou celles de l'auricule gauche avant son occlusion. Ce logiciel permet par ailleurs de simuler et repérer les incidences optimales en fluoroscopie. Ainsi, l'opérateur peut préparer le geste interventionnel et le choix des incidences de travail sans irradiation, en amont de la procédure. Certains logiciels permettent une navigation autour et en coupe du volume reconstruit (Fig 2).

Une impression en 3D des modèles segmentés ou une vision en réalité augmentée ou enfin une vision en hologramme est possible (23). D'autres logiciels permettent ensuite la fusion de ce modèle 3D avec la fluoroscopie durant le geste interventionnel.

Fusion tomodensitométrie - fluoroscopie

Les données tomodensitométriques peuvent être fusionnées avec la fluoroscopie. Cette fusion est réalisée en 3 étapes. Dans un premier temps, la phase d'acquisition permet l'obtention des données par tomodensitométrie. Puis, le volume 3D de la zone à fusionner est reconstruit. Une segmentation des structures d'intérêt est réalisée, incluant la zone à imager et une structure fixe radio-opaque comme le rachis servant de référentiel pour la fusion. Enfin, le volume retravaillé est fusionné avec la fluoroscopie (Fig 3). Cette fusion n'est toutefois pas en temps-réel et le volume fusionné est figé, ne suivant par exemple pas les mouvements thoraciques respiratoires. L'apport pour le traitement endovasculaire des pathologies congénitales ou acquises des vaisseaux aortiques, pulmonaires et des conduits cavo-pulmonaires a été suggéré (11,13,24). Tout d'abord, la rotation du volume 3D est couplée à la rotation de l'arceau de fluoroscopie permettant de choisir l'incidence de choix de travail en fluoroscopie sans angiographie. Deuxièmement, durant le geste interventionnel, le positionnement du dispositif médical est réalisable sans angiographie (Fig 4). Enfin, la modélisation 3D peut intégrer des structures anatomiques d'intérêt autour de la lésion. Il est par exemple possible de vérifier la position des coronaires lors d'un geste de remplacement valvulaire percutané pulmonaire.

Ainsi, un éventuel risque de compression coronaire extrinsèque par la valve prothétique peut être plus aisément anticipé et prévenu. En facilitant les procédures endovasculaires complexes, cette fusion d'image permet une diminution de l'irradiation (24,25).

Imagerie par résonance magnétique

L'imagerie par résonance magnétique est utilisée en pratique courante pour l'analyse pré-procédurale. Considérée comme la technique de référence pour les analyses volumétriques et fonctionnelles cardiaques, elle permet de préciser les indications de reevaluation des voies droites défaillantes dans l'évolution de cardiopathies cono-troncales opérées comme la tétralogie de Fallot. Au-delà de cette indication, l'IRM est également employée pour l'analyse des anomalies vasculaires comme la coarctation de l'aorte. Cet examen connaît une évolution majeure avec l'avènement des séquences dites « 4D Flow » qui permettent de conjuguer une analyse morphologique et une analyse dynamique des volumes comme des fluides en un même temps. Appliquées à l'évaluation précathétérisme des lésions à traiter, elles permettent d'une part une analyse topographique, anatomique des lésions ou shunts, ainsi que l'analyse de leur(s) retentissement(s) via les volumes et les débits. Actuellement en cours de développement, une fusion de ces acquisitions isotropiques avec la fluoroscopie serait complémentaire avec les techniques actuelles.

Les cathétérismes peuvent-ils être guidés par IRM ?

Certaines équipes essaient de développer le cathétérisme guidé par IRM classique sans fluoroscopie. De multiples contraintes techniques et matérielles sont à résoudre. Une imagerie temps réel avec une cadence image de 5 à 10 images par seconde est devenue possible par une adaptation des protocoles d'acquisition, de traitement et de présentation des données. Des sondes spécifiques ont dû être développées sans phénomène d'échauffement. Il semble désormais possible de réaliser des cathétérismes droits guidés par IRM aussi rapidement que guidés par fluoroscopie (26). Des procédures interventionnelles comme des fermetures de shunts intracardiaques ou le stenting de coarctation ont été réalisées chez l'animal (26) et plus récemment des dilatations valvulaires pulmonaires chez l'homme (27). Ces travaux illustrent le début de la translation de la cardiologie interventionnelle guidée par IRM vers la pratique clinique. Outre l'absence d'irradiation, les dernières évolutions de l'IRM cardiaque permettent une excellente visualisation des tissus et des flux sanguins et ouvrent la voie aux procédures par fusion d'images. Néanmoins, la complexité de l'équipement logistique, et le manque de disponibilité des machines confinent encore cette pratique aux programmes de recherche.

Cartographie électro-magnétique

La rythmologie interventionnelle s'est considérablement développée durant la dernière décennie permettant de traiter par voie endovasculaire les arythmies supra-ventriculaires ou ventriculaires les plus variées, en particulier secondaires aux cicatrices cardiaques des chirurgies antérieures, avec un taux de récurrence à long terme actuellement faible.

Une représentation de la séquence précise d'activation ou de la zone d'émergence de ces arythmies réentrantes ou focale est nécessaire pour comprendre leurs circuits et diriger le site où l'ablation par radiofréquence va être efficace. Des systèmes fiables permettant de réaliser des cartes d'activation électriques en 3 dimensions se sont développés (Fig 5 et 6), basés sur un repérage spatial précis de la sonde d'exploration et/ou ablation par magnétisme ou mesure d'impédance avec une résolution d'environ 1 mm. Les systèmes de cartographie à très haute densité de points ont remplacé les systèmes précédents permettant l'étude encore plus fine du circuit et mécanisme parfois complexe des arythmies. Ces données peuvent être fusionnées avec les données anatomiques d'une tomographie/IRM/angiographie/fluoroscopie. Cela peut s'avérer utile pour comprendre les cartes d'activations électriques et guider le trajet des sondes d'ablation dans les cavités cardiaques dans les cardiopathies congénitales avec montage chirurgical complexe, ou sécuriser une procédure d'ablation par exemple épicaudique à proximité des troncs coronaires.

Printing

L'impression 3D a généré beaucoup d'engouement sur les dernières années. De multiples matériaux solides ou mous peuvent être utilisés pour l'impression 3D. L'impression de l'enveloppe externe du cœur et des vaisseaux ou à l'inverse d'un moule de l'intérieur des vaisseaux peuvent être réalisés (28,29). Les modèles imprimés 3D sont particulièrement didactiques et utiles pour l'enseignement et pour l'information des patients. Ils peuvent aussi être utilisés pour anticiper la faisabilité ou la stratégie avant cathétérisme interventionnel complexe comme la réévaluation pulmonaire percutanée des voies droites natives larges (30). Néanmoins, une discordance a souvent été observée entre le geste planifié et le geste réalisé car les modèles utilisés ne permettaient pas d'intégrer les caractéristiques physiques en particulier l'élasticité des tissus et la variation des mensurations au cours du cycle cardiaque (30).

Perspectives

Le développement et l'intégration des différentes techniques d'imagerie bouleversent l'approche de l'imagerie en salle de cathétérisme. Le geste se prépare et s'anticipe de plus en plus en amont de la procédure avec modélisation tridimensionnelle des lésions à traiter. Ces modélisations tridimensionnelles peuvent se décliner de multiples façons, de l'analyse et navigation virtuelle dans le volume 3D segmenté et reconstruit, éventuellement en réalité augmentée à l'impression 3D de la zone à traiter. Durant la procédure, le geste est guidé par de multiples techniques d'imagerie éventuellement fusionnées. Les procédures sont accélérées avec une moindre place de la fluoroscopie conventionnelle et ainsi moins d'irradiation. Ces nouvelles approches de l'imagerie vont permettre de faciliter le guidage des gestes interventionnels complexes (plastie valvulaire tricuspide ou mitrale percutanée et d'offrir de nouvelles perspectives pour des procédures en cours de développement (Potts percutané, dérivation cavo-pulmonaire percutanée, ...).

Conflits d'intérêts

Aucun.

Références

1. Rubio-Alvarez V, Limon R, Soni J. (Intracardiac valvulotomy by means of a catheter). *Arch Inst Cardiol Mex.* 1953;23:183-92.
2. Hascoet S, Hadeed K, Marchal P, Dulac Y, Alacoque X, Heitz F, et al. The relation between atrial septal defect shape, diameter, and area using three-dimensional transoesophageal echocardiography and balloon sizing during percutaneous closure in children. *Eur Heart J Cardiovasc Imaging.* 2015;16:747-55.
3. Hascoet S, Jalal Z, Baruteau A, Mauri L, Chalard A, Bouzguenda I, et al. Stenting in paediatric and adult congenital heart diseases: A French multicentre study in the current era. *Arch Cardiovasc Dis.* 2015;108:650-60.
4. Hascoet S, Acar P, Boudjemline Y. Transcatheter pulmonary valvulation: current indications and available devices. *Arch Cardiovasc Dis.* 2014;107:625-34.
5. Laredo M, Frank R, Waintraub X, Gandjbakhch E, Iserin L, Hascoet S, et al. Ten-year outcomes of monomorphic ventricular tachycardia catheter ablation in repaired tetralogy of Fallot. *Arch Cardiovasc Dis.* 2017;110:292-302.
6. Combes N, Derval N, Hascoet S, Zhao A, Amet D, Le Bloa M, et al. Ablation of supraventricular arrhythmias in adult congenital heart disease: A contemporary review. *Arch Cardiovasc Dis.* 2017;110:334-45.
7. Maury P, Sacher F, Rollin A, Mondoly P, Duparc A, Zeppenfeld K, et al. Ventricular arrhythmias and sudden death in tetralogy of Fallot. *Arch Cardiovasc Dis.* 2017;110:354-62.
8. Hascoet S, Warin-Fresse K, Baruteau AE, Hadeed K, Karsenty C, Petit J, et al. Cardiac imaging of congenital heart diseases during interventional procedures continues to evolve: Pros and cons of the main techniques. *Arch Cardiovasc Dis.* 2016;109:128-42.
9. Maury P, Capellino S, Hascoet S. High-density biatrial activation mapping during typical atrial flutter after bicavopulmonary bypass. *Europace : European pacing, arrhythmias, and cardiac electrophysiology : journal of the working groups on cardiac pacing, arrhythmias, and cardiac cellular electrophysiology of the European Society of Cardiology.* 2016;18:1342.
10. Sundermann SH, Biaggi P, Grunenfelder J, Gessat M, Felix C, Bettex D, et al. Safety and feasibility of novel technology fusing echocardiography and fluoroscopy images during MitraClip interventions. *EuroIntervention.* 2014;9:1210-6.
11. Glockler M, Halbfabeta J, Koch A, Achenbach S, Dittrich S. Multimodality 3D-roadmap for cardiovascular interventions in congenital heart disease--a single-center, retrospective analysis of 78 cases. *Catheter Cardiovasc Interv.* 2013;82:436-42.
12. Jone PN, Ross MM, Bracken JA, Mulvahill MJ, Di Maria MV, Fagan TE. Feasibility and Safety of Using a Fused Echocardiography/Fluoroscopy Imaging System in Patients with Congenital Heart Disease. *J Am Soc Echocardiogr.* 2016;29:513-21.
13. Glatz AC, Zhu X, Gillespie MJ, Hanna BD, Rome JJ. Use of angiographic CT imaging in the cardiac catheterization laboratory for congenital heart disease. *JACC Cardiovascular imaging.* 2010;3:1149-57.
14. Stenger A, Dittrich S, Glockler M. Three-Dimensional Rotational Angiography in the Pediatric Cath Lab: Optimizing Aortic Interventions. *Pediatr Cardiol.* 2016;37:528-36.
15. Baysson H, Etard C, Brisse HJ, Bernier MO. Diagnostic radiation exposure in children and cancer risk: current knowledge and perspectives. *Arch Pediatr.* 2012;19:64-73.
16. Onnasch DG, Schroder FK, Fischer G, Kramer HH. Diagnostic reference levels and effective dose in paediatric cardiac catheterization. *Br J Radiol* 2007;80:177-85.
17. Hascoet S, Peyre M, Hadeed K, Alacoque X, Chausseray G, Fesseau R, et al. Safety and efficiency of the new micro-multiplane transoesophageal probe in paediatric cardiology. *Arch Cardiovasc Dis.* 2014;107:361-70.
18. Hascoet S, Hadeed K, Marchal P, Dulac Y, Alacoque X, Heitz F, et al. The relation between atrial septal defect shape, diameter, and area using three-dimensional transoesophageal echocardiography and balloon sizing during percutaneous closure in children. *Eur Heart J Cardiovasc Imaging.* 2015;16:747-55.
19. Assaidi A, Sumian M, Mauri L, Mancini J, Ovaert C, Salaun E, et al. Transcatheter closure of complex atrial septal defects is efficient under intracardiac echocardiographic guidance. *Arch Cardiovasc Dis.* 2014;107:646-53.
20. Schubert S, Kainz S, Peters B, Berger F, Ewert P. Interventional closure of atrial septal defects without fluoroscopy in adult and pediatric patients. *Clin Res Cardiol.* 2012;101:691-700.
21. Barnaoui S, Rehel JL, Baysson H, Boudjemline Y, Girodon B, Bernier MO, et al. Local reference levels and organ doses from pediatric cardiac interventional procedures. *Pediatr Cardiol.* 2014;35:1037-45.
22. Gafoor S, Schulz P, Heuer L, Matic P, Franke J, Bertog S, et al. Use of EchoNavigator, a novel echocardiography-fluoroscopy overlay system, for transeptal puncture and left atrial appendage occlusion. *J Interv Cardiol.* 2015;28:215-7.
23. Bruckheimer E, Rotschild C. Holography for imaging in structural heart disease. *EuroIntervention.* 2016;12 Suppl X:X81-X4.
24. Hertault A, Maurel B, Sobocinski J, Martin Gonzalez T, Le Roux M, Azzouf R, et al. Impact of hybrid rooms with image fusion on radiation exposure during endovascular aortic repair. *Eur J Vasc Endovasc Surg.* 2014 Oct;48:382-90.
25. Hertault A, Maurel B, Midulla M, Bordier C, Desponds L, Saeed Kilani M, et al. Editor's Choice - Minimizing Radiation Exposure During Endovascular Procedures: Basic Knowledge, Literature Review, and Reporting Standards. *Eur J Vasc Endovasc Surg.* 2015;50:21-36.
26. Ratnayaka K, Saikus CE, Faranesh AZ, Bell JA, Barbash IM, Kocaturk O, et al. Closed-chest transthoracic magnetic resonance imaging-guided ventricular septal defect closure in swine. *JACC Cardiovasc Interv.* 2011;4:1326-34.
27. Tzifa A, Krombach GA, Kramer N, Kruger S, Schutte A, von Walter M, et al. Magnetic resonance-guided cardiac interventions using magnetic resonance-compatible devices: a preclinical study and first-in-man congenital interventions. *Circ Cardiovasc Interv.* 2010;3:585-92.
28. Farooqi KM, Nielsen JC, Uppu SC, Srivastava S, Parness IA, Sanz J, et al. Use of 3-dimensional printing to demonstrate complex intracardiac relationships in double-outlet right ventricle for surgical planning. *Circ Cardiovasc Imaging.* 2015;8(5). doi: 10.1161/CIRCIMAGING.114.003043.
29. Hadeed K, Dulac Y, Acar P. Three-dimensional printing of a complex CHD to plan surgical repair. *Cardiology in the young.* 2016;26:1432-4.
30. Phillips AB, Nevin P, Shah A, Olshove V, Garg R, Zahn EM. Development of a novel hybrid strategy for transcatheter pulmonary valve placement in patients following transannular patch repair of tetralogy of fallot. *Catheter Cardiovasc Interv.* 2016;87:403-10.

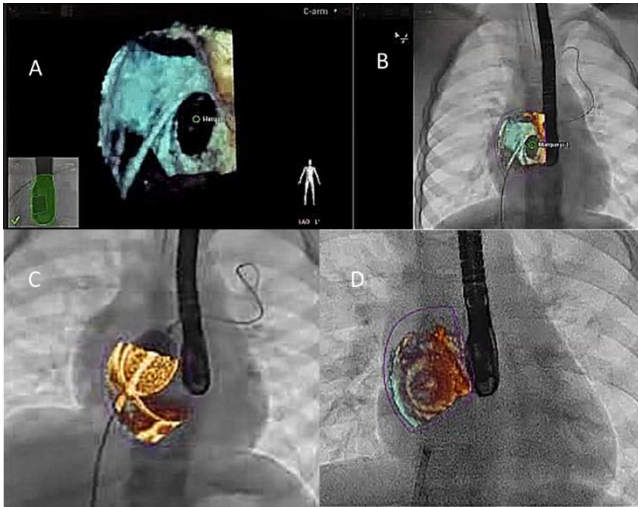


Figure 1. Fermeture de communication inter-atriale guidée par Echonavigator. A vue 3D en face à partir de l'oreillette droite de la communication inter-atriale dans le même plan que la fluoroscopie B. La communication inter-atriale est ovalaire, traversée par un guide. B vue en fluoroscopie du massif cardiaque avec fusion temps-réel de l'image échocardiographique 3D de la communication inter-atriale. C vue en fluoroscopie du massif cardiaque lors de la calibration au ballonnet de la communication inter-atriale avec fusion temps-réel de l'image échocardiographique 3D et vue en fluoroscopie du massif cardiaque avec fusion temps-réel de l'image échocardiographique 3D de la communication inter-atriale après mise en place de la prothèse.

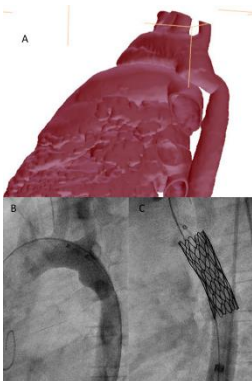


Figure 2. A Modélisation 3D d'une coarctation aortique avec angulation important de l'isthme aortique. B Angiographie de l'isthme aortique. L'aspect 2D de l'isthme aortique paraît faussement rassurant. La coarctation est significative avec un gradient invasif pic à pic de 20 mmHg sur l'isthme aortique. C angiographie après stenting.

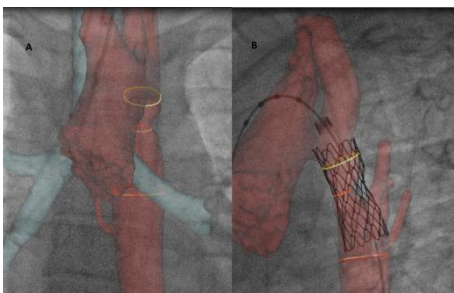


Figure 3. Fusion de la fluoroscopie avec un volume 3D reconstruit à partir d'une tomographie d'une coarctation de l'aorte (Rouge) et des artères pulmonaires (Bleu) avant (A) puis après stenting (B).

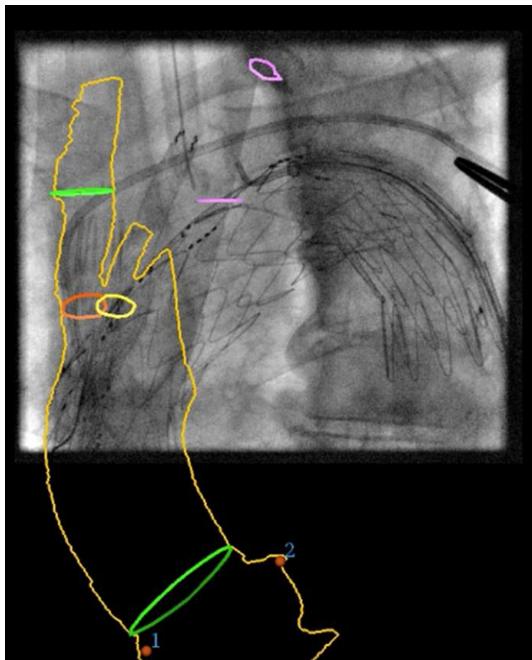


Figure 4. Fusion entre les contours de l'aorte ascendante modélisée à partir des données d'une tomодensitométrie et de la fluoroscopie pour le traitement endovasculaire d'un anévrisme de la crosse aortique. La fusion permet de conserver les repères spatiaux de l'aorte tout en colmatant la fluoroscopie sur la zone d'intérêt, permettant ainsi de diminuer le taux d'irradiation.

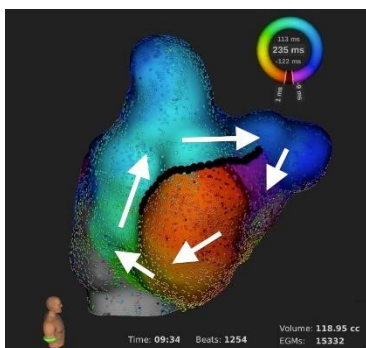


Figure 5. Carte d'activation électrique d'une tachycardie atriale droite sur cicatrice d'atriotomie compliquant l'évolution d'une communication interatriale opérée. Plus de 15000 points ont été collectés sur 9 minutes (1200 battements) offrant une représentation tridimensionnelle. La ligne de points noirs correspond à la cicatrice d'atriotomie. Les flèches blanches montrent le circuit d'activation de l'arythmie. (Système Rhythmia HDX™)

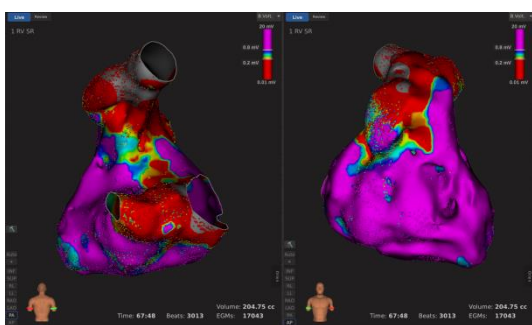


Figure 6. Carte d'activation en rythme sinusal du ventricule droit chez un patient ayant une tétralogie de Fallot réparée et ayant eu une tachycardie ventriculaire. (Système Rhythmia HDX™) Cartographie 3D haute densité de voltage, à gauche vue postérieure, à droite vue antérieure. Le sinus coronaire dilaté se projette en arrière. En mauve est représenté le myocarde sain, en rouge les zones bas voltées avec vitesse de conduction <0,2mV correspondant aux cicatrices denses (patch de communication interventriculaire septal, patch infundibulaire en avant), en gris l'anneau tricuspide et l'artère pulmonaire. En jaune et orange les zones pathologiques suggérant une conduction lente possible. L'isthme de la tachycardie ventriculaire était situé entre le patch de communication interventriculaire septal et l'anneau pulmonaire postérieur.