

Échocardiographie tridimensionnelle temps réel transœsophagienne (ETO 3D temps réel)

Introduction

L'échographie cardiaque s'est enrichie ces dernières années de sondes œsophagiennes matricielles tridimensionnelles, miniaturisées dont la fréquence d'émission varie de 2 à 7 MHz. La sonde transœsophagienne 3D comporte approximativement 3 000 éléments prézoélectriques comparativement aux 64 éléments utilisés de manière standard en ETO 2D. Elle est de la même taille que la sonde ETO 2D et permet l'acquisition directe d'un volume cardiaque en temps réel (3D live) sans nécessité de synchronisation avec l'ECG. Les problèmes d'artefacts d'acquisition liés à la respiration ou aux arythmies cardiaques sont éliminés.

En effet, avec la sonde ETO 3D temps réel différents modes de visualisation sont possibles :

- bidimensionnel multiplan (rotation sur 180°);
- tridimensionnel en temps réel (*full volume* et « zoom 3D » compris);
- multiplanaire par « recoupe » illimitée des plans dans le bloc volumique 3D;
- mode Doppler couleur 3D.

L'ETO 3D temps réel permettant une étude complète des structures cardiaques et des flux sanguins intracardiaques accroît les capacités diagnostiques qualitatives et quantitatives de l'échocardiographie.

Intérêts cliniques de l'ETO 3D

Les principales indications « spécifiques » de l'ETO 3D temps réel sont :

- les valvulopathies : mitrales en particulier;
- les communications interauriculaires;
- les procédures de cardiologie interventionnelle et chirurgicale;
- les pathologies aortiques.

Les autres applications de l'ETO 3D sont également valables et cliniquement « rentables » : les lésions endocarditiques, les masses intracardiaques, les prothèses valvulaires, les malformations congénitales, etc.

Étude des valvulopathies mitrales en ETO 3D

L'ETO 3D temps réel ouvre de nouvelles perspectives dans l'exploration de la valve mitrale. Elle permet de mieux :

- analyser tous les segments de la valve mitrale, les régions commissurales et paracommissurales;
- étudier l'anneau mitral (morphologie, diamètre, surface, géométrie);
- explorer les prolapsus valvulaires complexes;
- quantifier les régurgitations mitrales;
- évaluer le degré de la sténose mitrale.

Analyse ETO 3D de la valve mitrale

De par sa structure tridimensionnelle complexe, la valve mitrale est parfaitement adaptée à l'étude 3D en ETO devenue « temps réel ». L'excellente résolution échographique spatiale offerte par la voie transœsophagienne autorise une approche tridimensionnelle précise et fiable de la valve mitrale.

L'objectif principal de l'ETO 3D est de présenter la valve mitrale en vue « chirurgicale » (figure 11.1) permettant aux échographistes comme aux chirurgiens de partager une vision commune. Le mode zoom 3D est particulièrement adapté à l'étude de la valve mitrale.

Acquisition de la valve mitrale en mode zoom 3D

Elle nécessite la réalisation de l'examen étape par étape selon la technique de Philips :

Première étape : définition de la « zone d'intérêt ».

Il est d'abord nécessaire de définir les limites de la « zone d'intérêt » constituant un volume cardiaque souhaité et non un plan simple. Cette zone d'intérêt volumique est délimitée à partir de deux plans orthogonaux simultanés afin de créer six faces de la pyramide 3D acquise.

En résultat :

- la limite supérieure de la zone d'intérêt définira la face supérieure du volume créé. Ce procédé permet d'obtenir une vue intra-atriale gauche : vue « chirurgicale » de la base du cœur (les valves auriculo-ventriculaires sont vues depuis les oreillettes et la valve aortique depuis l'aorte).

Cette vue « chirurgicale » est très utile pour étudier l'insuffisance mitrale. Une réduction de gain 3D est nécessaire afin de visualiser nettement la face atriale de la valve mitrale ;

- la limite inférieure de la zone d'intérêt définira la face inférieure du volume créé. Cette manipulation permet d'obtenir une vue intraventriculaire gauche particulièrement utile pour visualiser le rétrécissement mitral.

Deuxième étape : acquisition du volume dynamique.

Une fois la zone d'intérêt définie dans les deux plans, la pression du bouton zoom 3D de l'échographe permet la visualisation du volume cardiaque en temps réel. La rotation (bouton « tournez Z ») et la bascule du volume (avec le *trackball*) permettent d'orienter la valve mitrale en vue « chirurgicale ». En effet, le volume cardiaque acquis peut être mobilisé dans différentes directions pour accéder à une analyse de la valve mitrale sous différents angles de vue.

Troisième étape : navigation dans le volume cardiaque.

Le volume cardiaque obtenu en ETO 3D peut être « découpé » informatiquement. Cette découpe peut s'effectuer dans les différents plans de l'espace (« découpe multiplan ») permettant d'obtenir des coupes bidimensionnelles souhaitées. Ainsi des coupes 2D passant exactement par les segments mitraux au choix ($A_1 P_1$; $A_2 P_2$; $A_3 P_3$) ou des commissures sont possibles (cf. fig. 10.12).

En résumé, l'ETO 3D temps réel permet une analyse anatomique et dynamique complète de la valve mitrale et améliore la discussion entre



Figure 11.1. Vue 3D de face intra-atriale « chirurgicale » de la valve mitrale en mode *full screen*.

chirurgien et échographiste qui devient indispensable pour une décision thérapeutique adéquate.

Étude de prolapsus valvulaire mitral

Classiquement, en ETO 3D le diagnostic du prolapsus valvulaire mitral (PVM) est retenu en échocardiographie transthoracique (ETT) à partir de la coupe 2D de «référence» parasternale longitudinale selon un critère bien défini (recul de plus de 2 mm du corps ou de l'extrémité d'un segment valvulaire par rapport au plan de l'anneau mitral).

Le but de l'échographie 3D temps réel en ETT et notamment en ETO est double :

- la confirmation et l'affinement du diagnostic lésionnel du PVM;
- l'évaluation précise de la réparabilité des lésions mitrales.

L'ETO 3D temps réel permet une analyse complète du PVM en précisant :

- la localisation segmentaire du prolapsus en utilisant la vue 3D « chirurgicale », le mode zoom 3D et le mode multiplan (figure 11.2). Le « balayage » de l'orifice mitral depuis la région centrale vers les régions commissurales externe et interne permet de déterminer le prolapsus de tout ou d'une partie de l'un ou des deux feuillets mitraux (segments prolapsés) ainsi que les prolapsus juxta-commissuraux, peu accessibles en ETT;
- la présence d'une ou plusieurs ruptures de cordages avec leur localisation valvulaire d'origine;

- le degré d'épaississement « myxoïde » des feuillets mitraux (figure 11.3);
- le degré de la dilatation et de la déformation de l'anneau mitral;
- l'existence des calcifications annulaires et leur éventuelle extension ventriculaire gauche;
- la présence et la sévérité de la régurgitation mitrale.

Le mode Doppler couleur transœsophagienne permet d'identifier le nombre de fuites mitrales, leur origine et leur importance. Tous ces éléments diagnostiques échographiques 2D/3D permettent de distinguer quatre formes de gravité croissante de PVM :

- prolapsus mineur avec fuite mitrale minime négligeable;
- prolapsus touchant un seul segment d'un seul feuillet mitral sans rupture de cordages avec fuite valvulaire plus que minime;
- prolapsus avec rupture de cordages localisée à un seul segment d'un seul feuillet mitral avec fuite mitrale au moins modérée ;
- prolapsus dit « complexe » touchant plusieurs segments voire les trois segments des deux feuillets et entraînant souvent plusieurs points de fuite.

Cette classification de PVM est « pratique » et utile pour discuter la stratégie thérapeutique. Evidemment, entre ces quatre formes « classiques » tous les intermédiaires de PVM sont possibles.

En pratique, la réparabilité (percutanée ou chirurgicale) des lésions mitrales dues au prolapsus dépend surtout :

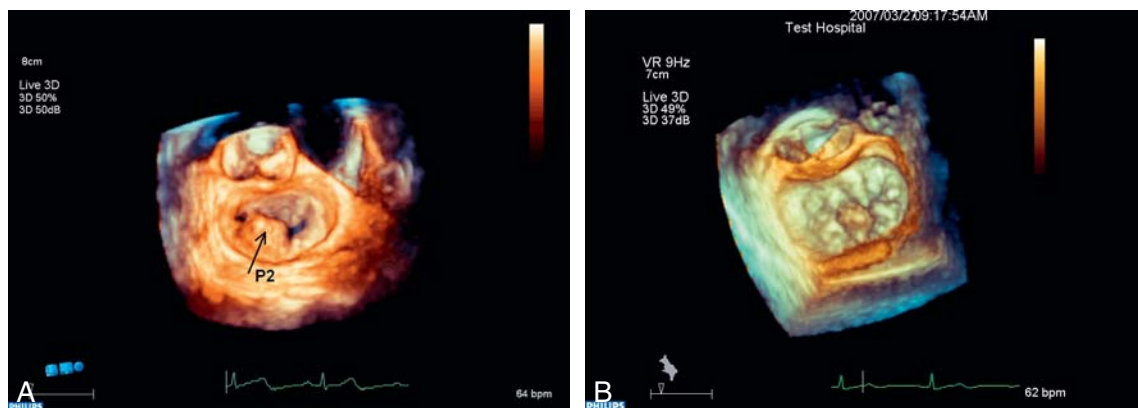


Figure 11.2. Exemples de prolapsus du segment P_2 de la petite valve mitrale visualisé en ETO 3D (A et B).

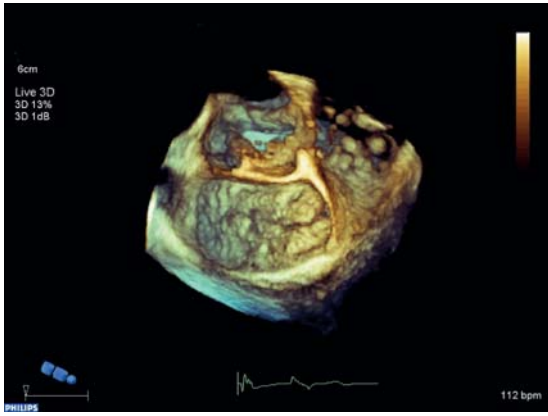


Figure 11.3. Maladie de Barlow. Image 3D de l'épaississement « myxoïde » de la valve mitrale.

- du nombre de segments valvulaires prolapsés ;
- du nombre et de la position segmentaire « d'origine » des cordages rompus ;
- de l'importance du remaniement valvulaire myxoïde ;
- de la sévérité de la fuite mitrale qui accompagne le prolapsus ;
- du retentissement hémodynamique de la fuite mitrale (ventriculaire, atriale et pulmonaire).

La combinaison de ces différents paramètres échographiques est nécessaire pour adopter une meilleure solution thérapeutique (chirurgie conservatrice, remplacement valvulaire). Il faut souligner que les prolapsus dit « complexes » restent difficilement accessibles à un geste conservateur. De même, les calcifications annulaires compliquent également la réparation mitrale, surtout en cas d'extension ventriculaire gauche.

Quantification des régurgitations mitrales en ETO 3D

La complexité de l'appareil valvulaire et sous-valvulaire mitral ainsi que les multiples mécanismes de l'IM justifient pleinement l'intérêt de l'échographie 3D dans cette indication. En rendu volumique, la 3D améliore la compréhension du mécanisme de l'IM et permet une quantification plus précise des fuites mitrales par rapport à l'échographie conventionnelle. Le Doppler couleur (en *full volume* ou en mode biplan) est très utile pour mieux analyser les trois composantes de la régurgitation mitrale :

- la zone de convergence ;
- la vena contracta ;
- l'extension spatiale du jet régurgitant dans l'oreillette gauche.

Étude 3D de la zone de convergence

La méthode de PISA (Proximal Isovelocity Surface Area) largement utilisée en Doppler couleur 2D transthoracique suppose que la zone de convergence (figure 11.4 A), située juste en amont de l'orifice mitral régurgitant soit hémisphérique (hypothèse de calcul de PISA).

Cette supposition est valable dans la grande majorité des cas d'insuffisance mitrale (IM) à condition que la forme de l'orifice régurgitant soit circulaire et localisée dans un plan. En réalité, la zone de convergence (PISA) n'est pas un hémisphère parfait, elle peut être déformée dans certaines situations, par exemple en cas de prolapsus isolé de la petite valve mitrale ou de prolapsus commissural (hémisphère tronqué ou héli-ellipse). Cette déformation géométrique de la zone de convergence conduit à une surestimation de la fuite mitrale. De même, dans l'IM fonctionnelle, la PISA peut être proche de deux voire trois hémisphères juxtaposés le long de l'orifice mitral en fente et conduire à une sous-estimation de l'IM.

Le Doppler couleur 3D et les « recoupes » de PISA 3D permettent de « démasquer » les déformations de PISA et de contrôler la cohérence entre les résultats obtenus en 2D (PISA 2D) et 3D (PISA 3D).

Étude 3D de la vena contracta

De même, la mesure de la largeur du jet régurgitant mitral à l'origine suppose que l'orifice régurgitant soit circulaire. Or, ceci est loin d'être toujours vrai car il existe une grande variété de formes des orifices, dont on ne mesure qu'une dimension en couleur 2D conventionnelle. Le Doppler couleur 3D applicable à la fuite mitrale permet de reconstruire la vena contracta en trois dimensions et de corriger d'éventuelles erreurs de mesures du Doppler couleur classique 2D (figure 11.4 B).

Étude 3D d'extension spatiale du jet régurgitant

L'extension du jet régurgitant mitral dans l'oreillette gauche utilisée dans l'appréciation quantitative d'une fuite mitrale est critiquée du fait de nombreux

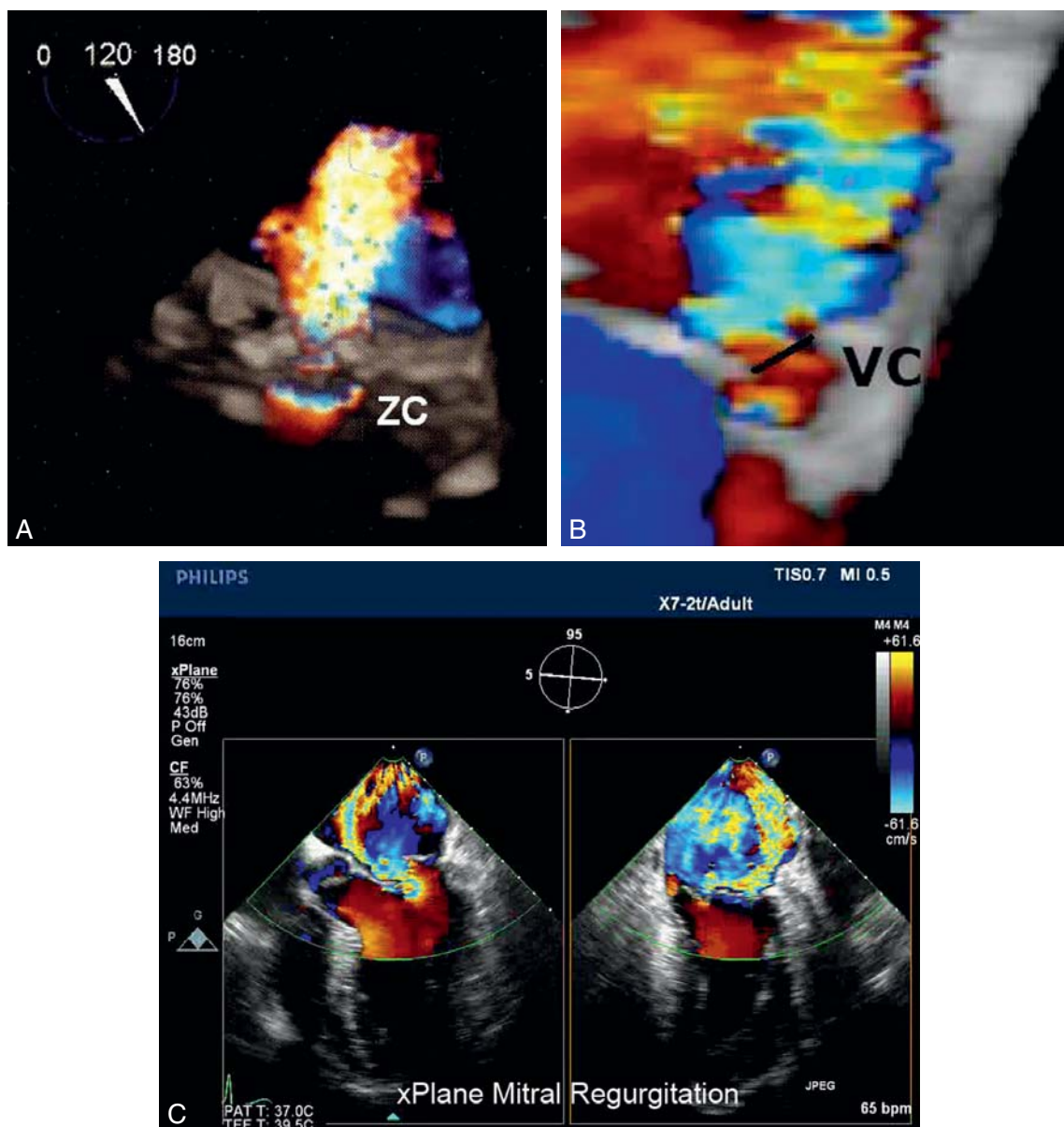


Figure 11.4. Quantification de l'insuffisance mitrale (IM) en ETO 3D.

- Étude de la zone de convergence (ZC) d'IM en mode *full volume* couleur.
- Étude de la vena contracta (VC) d'IM.
- Étude de l'extension d'IM en mode X-Plane (biplan).

facteurs déterminant sa propagation et sa taille (figure 11.4 C).

Le Doppler couleur 3D permet d'étudier en temps réel l'extension « spatiale » de la régurgitation mitrale. Il est surtout utile pour détecter les jets d'IM « atypiques » : excentrés, latéralisés, adhérents aux structures avoisinantes, commissuraux, multiples (en cas de prolapsus mitraux complexes).

Les autres méthodes de quantification de l'IM applicables en échocardiographie 3D ETT/ETO sont :

- l'étude du *tenting mitral*;
- la mesure de la surface de l'orifice mitral régurgitant;
- le calcul du volume de la régurgitation mitrale.

Étude du *tenting mitral*

La déformation de l'appareil mitral dans l'IM ischémique est caractérisée par une majoration de la surface sous la « tente » mitrale formée par les

deux feuillets mitraux (*tenting area*). Cette surface mesurée classiquement en ETT selon la coupe 2D longitudinale est corrélée à l'importance de la fuite mitrale. L'échographie 3D ETT/ETO permet d'améliorer l'étude du tenting mitral en précisant sa géométrie et son volume. L'application du programme informatique spécifique MVQ (Mitral Valve Quantification) en ETO 3D facilite la mesure du tenting mitral (figure 11.5).

Mesure de la surface de l'orifice mitral régurgitant (SOR)

Cette méthode de quantification de l'IM est déjà largement utilisée en ETT à partir de la PISA 2D. L'échographie 3D est susceptible d'améliorer la mesure de la SOR. Cette approche 3D est fondée sur 3 techniques :

- la planimétrie directe de l'orifice de régurgitation mitrale en « recoupe » 3D ETO ;
- la planimétrie de la « recoupe » de la racine du jet régurgitant en 3D ETO couleur ;
- le calcul de la SOR à partir de la PISA 3D selon les formules restant à définir.

Calcul du volume de régurgitation mitrale

La quantification de l'IM bénéficie également de l'imagerie 3D grâce à la fiabilité des mesures volumiques du ventricule gauche permettant de calculer directement le volume régurgité mitral en soustrayant le volume d'éjection aortique au volume

d'éjection ventriculaire gauche. L'échographie 3D permet la mesure fiable des volumes ventriculaires et la mesure précise des anneaux valvulaires, assimilés de façon approximative à des cercles dans les méthodes habituelles de calcul de débits.

La méthode de volumes ventriculaires déduits du 3D peut compléter l'arsenal des outils quantitatifs de la fuite mitrale.

En résumé, en plus d'une amélioration des mesures quantitatives anciennes, l'échographie 3D propose de nouvelles méthodes d'évaluation de la sévérité de l'insuffisance mitrale. Elle peut être également utilisée pour conforter les résultats obtenus avec les méthodes classiques ou comme alternative dans les cas difficiles.

Étude de la sténose mitrale en ETO 3D

La sténose mitrale bénéficie directement de l'apport de l'imagerie 3D en rendu volumique qui permet de mesurer la surface orificielle rétrécie et d'apprécier la possibilité de réalisation d'une commissurotomie (figure 11.6). L'ETO 3D temps réel est particulièrement utile chez les patients peu échogènes par voie transthoracique ou présentant des fortes calcifications valvulaires engendrant des cônes d'ombre en ETT. Elle permet une planimétrie de l'orifice mitral en recoupant l'échantillon 3D dans un plan perpendiculaire à l'orifice en

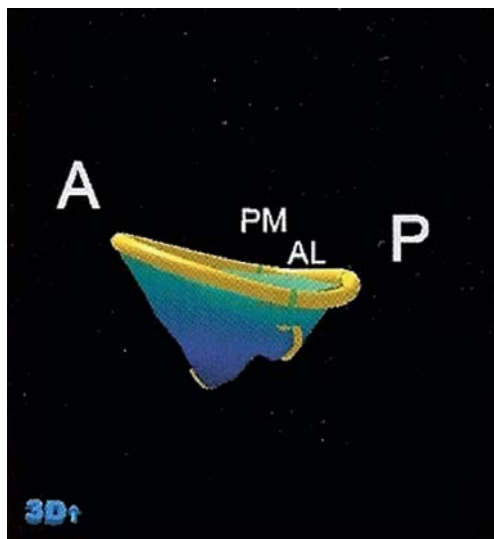


Figure 11.5. Étude du *tenting mitral* selon le modèle géométrique MVQ.

(système Philips)

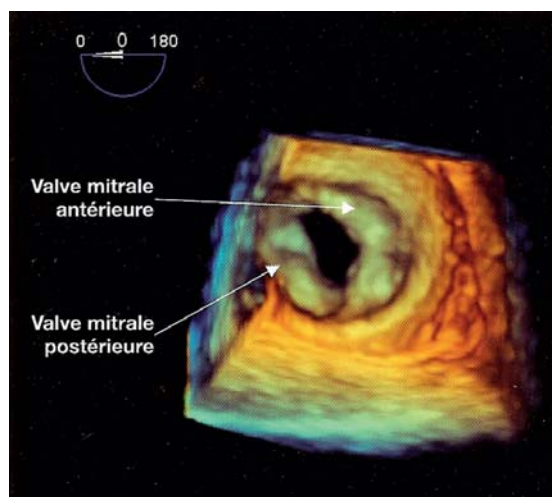


Figure 11.6. Sténose mitrale visualisée en mode zoom d'ETO 3D.

Source : E. Brochet, *Consensus cardio*, 2008.

passant précisément au sommet de l'entonnoir mitral. Grâce à un niveau de coupe parfaitement repéré dans l'espace, le véritable orifice mitral dit « anatomique » peut être mesuré de façon rapide et fiable en 3D. La mesure de la surface mitrale par planimétrie peut être effectuée en mode zoom ou *full volume* en utilisant le logiciel de découpe multiplanaire (QLAB). Le repositionnement des axes de découpe dans les différents plans permet d'affiner cette mesure.

Enfin, l'ETO 3D est utile pour mieux explorer les commissures mitrales :

- le degré de symphyse commissurale ;
- la présence des nodules fibrocalcaires commissuraux ;
- le degré de réouverture des commissures après commissurotomie.

Étude des valvulopathies aortiques en ETO 3D

L'ETO 3D temps réel est utile pour mieux voir certains aspects des valvulopathies aortiques difficiles à interpréter en 2D classique ou en ETT 3D. Elle peut aider à préciser le mécanisme d'une régurgitation aortique. En cas d'une bicuspidie aortique fuyante, l'ETO 3D permet de distinguer un orifice central, un orifice commissural ou un orifice en fente. Cette description « anatomique » précise est utile si l'on envisage un traitement chirurgical conservant les sigmoïdes aortiques. Dans le rétrécissement aortique dégénératif, l'ETO 3D permet :

- un examen détaillé de la morphologie de la valve aortique en visualisant par exemple la présence des calcifications localisées au fond des sigmoïdes aortiques ou siégeant uniquement aux bords libres de la valve ;
- la mesure précise de l'anneau aortique, de la chambre de chasse du ventricule gauche, qui n'est pas réellement circulaire mais plutôt ovale en réalité ;
- la planimétrie de l'orifice aortique sténosé (surface « anatomique ») réalisée sur les recoups du volume 3D. L'avantage de l'imagerie 3D par rapport au 2D classique réside dans l'acquisition simultanée de deux coupes perpendiculaires : la coupe petit axe pour la planimétrie de l'orifice

aortique, et la coupe grand axe pour le positionnement précis de l'image petit axe au bord libre des sigmoïdes aortiques.

Étude des valvulopathies tricuspidiennes en ETO 3D

L'échographie 3D en ETT et surtout en ETO est la seule méthode échographique permettant d'obtenir une vue « intracardiaque » simultanée des trois feuillets tricuspidiens. Elle est particulièrement utile pour :

- mieux préciser la topographie valvulaire des lésions « localisées » en cas de prolapsus tricuspidiens ou de végétations par exemple. Les vues 3D ventriculaires de la valve tricuspide permettent de décrire le mécanisme de la coaptation valvulaire et de la fuite tricuspide ;
- mieux quantifier la régurgitation tricuspide en utilisant le Doppler couleur 3D en particulier ;
- mieux évaluer le retentissement hémodynamique d'une valvulopathie tricuspide au niveau ventriculaire droit (volume, fraction d'éjection) et atriale (volume, fonction).

Enfin, le résultat de la plastie chirurgicale de la valve tricuspide peut être apprécié sur les images 3D.

Étude des communications interauriculaires en ETO 3D

Le septum interauriculaire (SIA) est une structure complexe constituée de deux feuillets :

- le septum primum de nature endocardique sur la face atriale gauche ;
- le septum secundum de nature myocardique sur la face atriale droite.

Physiologiquement, il existe chez le fœtus un shunt droit-gauche au sein de la fosse ovale du SIA à travers un foramen ovale perméable (FOP). À la naissance, l'élévation des pressions gauches induit classiquement la fermeture du FOP, mais sa persistance est possible.

La communication interauriculaire (CIA) constitue un défaut anatomique congénital de la partie moyenne du SIA correspondant à une CIA de type *ostium secundum* (forme la plus fréquente).

Étude échographique du SIA

Le SIA est explorable en ETT, ETO 2D et ETO 3D :

- en ETT, le SIA peut être examiné selon différentes coupes 2D. Cependant, il faut se méfier des fausses images de CIA en coupe apicale transthoracique des quatre cavités correspondant à la fosse ovale de faible échogénéicité;
- En ETO 2D multiplan, le SIA peut être visualisé dans différentes incidences. La coupe à 110° dite « bi-cave » est particulièrement utile pour aborder la fosse ovale.
- En ETO 3D temps réel, le SIA est analysable de façon intégrale et précise. La vue unique « en face » du SIA (de l'oreillette gauche) permet une visualisation parfaite du septum primum et la recherche d'éventuels défauts septaux (FOP, CIA).

Étude du FOP

L'ETT en imagerie harmonique, complétée par l'épreuve de contraste permet un dépistage du foramen ovale perméable. L'ETO est utile pour préciser la localisation septale exacte du passage des microbulles de contraste et pour mesurer la taille du FOP (le diamètre et la longueur du tunnel). Elle permet aussi de détecter une éventuelle CIA associée.

Étude de la CIA

L'ETO 3D temps réel possède plusieurs avantages par rapport à l'ETO 2D. Elle permet une analyse précise de l'anatomie et de la morphologie de la CIA. Contrairement à l'ETO 2D nécessitant une analyse dans de multiples incidences, l'ETO 3D permet une visualisation « en face » de la CIA précisant :

- la variante anatomique de la CIA (type ostium secundum, ostium primum, sinus venosus, sinus coronaire);
- la forme du défaut septal (circulaire ou ovulaire);
- La taille exacte de la CIA (par planimétrie ou en utilisant un logiciel de reconstruction multiplan QLAB);
- le caractère unique ou multiple de la CIA;
- la qualité des berges de la CIA;
- la présence d'éventuelles anomalies associées à la CIA (prolapsus mitral, rétrécissement pulmonaire, retour veineux pulmonaire anormal...).

Le Doppler couleur 3D permet la visualisation du shunt interatrial (direction, extension spatiale) et sa quantification. Tous ces renseignements supplémentaires sont particulièrement utiles en vue d'une éventuelle fermeture de la CIA (soit percutanée, soit chirurgicale).

Apport de l'ETO 3D en cardiologie interventionnelle et chirurgicale

L'ETO 3D temps réel est d'un apport particulièrement intéressant en chirurgie cardiaque et lors des cathétérismes interventionnels des procédures percutanées. Elle permet de :

- mieux guider les interventions percutanées :
 - la commissurotomie mitrale percutanée;
 - la fermeture de la communication interauriculaire ou de FOP;
 - l'implantation percutanée des prothèses valvulaires aortiques;
 - la plastie mitrale percutanée;
 - l'occlusion de l'auricule gauche;
 - la fermeture de l'orifice de régurgitation mitral paraprothétique;
 - la correction percutanée de la coarctation aortique;
 - les interventions cardiologiques rythmologiques percutanées;
- mieux contrôler les interventions chirurgicales :
 - la commissurotomie mitrale chirurgicale;
 - la plastie mitrale chirurgicale;
 - les remplacements valvulaires;
 - les interventions myocardiques et péricardiques;
 - la chirurgie aortique;
 - la correction des malformations congénitales;
- mieux surveiller la fonction ventriculaire en cardiologie interventionnelle et chirurgicale.

Aide de l'ETO 3D aux procédures percutanées

L'ETO 3D temps réel est un complément important de l'ETO 2D au cours des interventions cardiaques percutanées grâce à :

- un excellent rendu volumique 3D en temps réel;
- une analyse « en face » des structures cardiaques (septum interauriculaire, valve mitrale...);
- des vues « intracardiaques » totalement nouvelles : vues anatomiques, chirurgicales (semblables à celles obtenues par le chirurgien).

En effet, l'ETO 3D temps réel permet :

- une analyse instantanée précise des lésions cardiaques à réparer;
- un meilleur repérage des zones cibles de l'intervention;
- un guidage en temps réel et dans l'espace des cathéters et des dispositifs intracardiaques en précisant leur position par rapport aux structures voisines au cours de l'intervention.

Commissurotomie mitrale percutanée (CMP)

La sélection des patients « candidats » à la CMP doit tenir compte des données cliniques et anatomiques apportées par l'ETT et l'ETO. L'ETO 3D temps réel est particulièrement utile au cours d'une CMP chez les porteurs d'une sténose mitrale. Elle permet :

- avant la procédure : de préciser la géométrie exacte de l'orifice mitral, le degré et la symétrie de la fusion des commissures qui sont des déterminants importants pour la prédiction du succès de la CMP. L'ETO permet également d'éliminer un thrombus siégeant dans l'OG, et surtout dans l'auricule gauche;
- lors de la procédure : de guider le cathétérisme transeptal en visualisant un aspect caractéristique du septum interatrial en « tente » lors de la ponction septale, de suivre le cheminement du ballon de dilatation dans l'oreillette gauche, son orientation vers l'orifice mitral et enfin son bon positionnement transmitral au cours de l'inflation du ballon (figure 11.7);
- après la procédure : de vérifier l'efficacité du geste de dilatation (augmentation de l'aire valvulaire, le degré de réouverture des commissures, l'absence de fuite mitrale « traumatique »).

Fermeture percutanée de la CIA

L'ETO 3D temps réel est une avancée importante dans l'analyse et la surveillance échographiques de la fermeture percutanée de la CIA,

en complément de l'ETO 2D (figure 11.8). Elle apporte les renseignements supplémentaires à chaque étape de la procédure :

- avant la procédure : l'analyse morphologique spatiale de la CIA (la localisation, la forme anatomique, la surface, le nombre des défauts septaux, les variations de taille systolo-diastolique de la CIA, la qualité des berges, le diamètre « étiré » de la CIA conditionnant la taille de la prothèse septale).

Toutes ces informations sont indispensables afin de choisir le matériel prothétique le plus approprié pour une fermeture étanche de la CIA. Enfin, une berge déficiente est une contre-indication à la fermeture percutanée et doit conduire à une fermeture chirurgicale de la CIA;

- pendant la procédure : de suivre en temps réel la progression du guide lors du franchissement du défaut septal, le positionnement de la prothèse d'Amplatz (la plus utilisée) « à cheval » sur le septum et le déploiement du versant gauche et du versant droit de la prothèse, en s'assurant de la bonne « capture » des berges entre les deux disques prothétiques.
- après la procédure : la vérification du positionnement septal optimal de la prothèse, l'analyse de la morphologie de la prothèse (son endothelialisation), et de ses relations avec les structures adjacentes (figure 11.9).

Implantation percutanée des prothèses valvulaires aortiques

Le remplacement valvulaire aortique (RVA) percutané est arrivé à une maturité technique et constitue une alternative au remplacement chirurgical classique. Il est surtout indiqué chez les patients à haut risque opératoire ou avec une contre-indication au RVA classique.

L'ETO 3D temps réel est particulièrement adaptée à la procédure d'implantation des prothèses aortiques percutanées (par voie artérielle transfémorale ou par défaut par voie transapicale). Ici encore, les qualités de la visualisation de la valve aortique et de repérage spatial de l'ETO 3D sont un atout majeur au cours de l'intervention.

En fait, l'ETO 3D temps réel aide dans :

- le positionnement précis de la prothèse valvulaire au niveau de l'orifice aortique (figure 11.10);

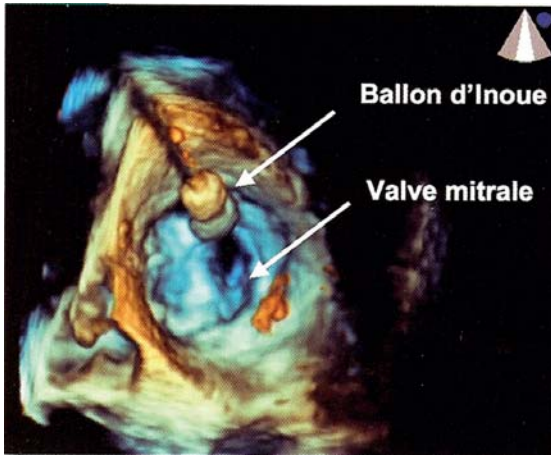


Figure 11.7. Commissurotomie mitrale percutanée. Positionnement du ballon de dilatation dans l'oreillette gauche au dessus de la valve mitrale sténosée.

Source : M.-C. Malergue, E. Brochet, *ÉchoCardiographie*, n° 19, 2009.

- la visualisation séparée de la prothèse et du ballon sur lequel elle est implantée ;
- l'insertion annulaire aortique étanche de la prothèse (la prothèse comprimée sur un ballonnet est larguée par gonflage du ballonnet) ;
- la localisation d'une éventuelle fuite aortique : périprothétique ou intraprothétique (mauvais positionnement ou dysfonction valvulaire primaire).

Plastie mitrale percutanée

La plastie mitrale percutanée est une nouvelle technique au cours du développement permettant une réparation des fuites mitrales fonctionnelles et dégénératives dues aux prolapsus valvulaires localisés et médians en particulier. Elle est surtout indiquée chez les patients ayant un risque opératoire élevé. Le principe de cette technique est de transformer l'orifice mitral en deux héli-orifices.

La technique de suture « bord à bord », reproduisant l'intervention chirurgicale d'Alfieri, est la plus utilisée. La réparation percutanée par pose d'un clip qui vient littéralement agraffer les deux

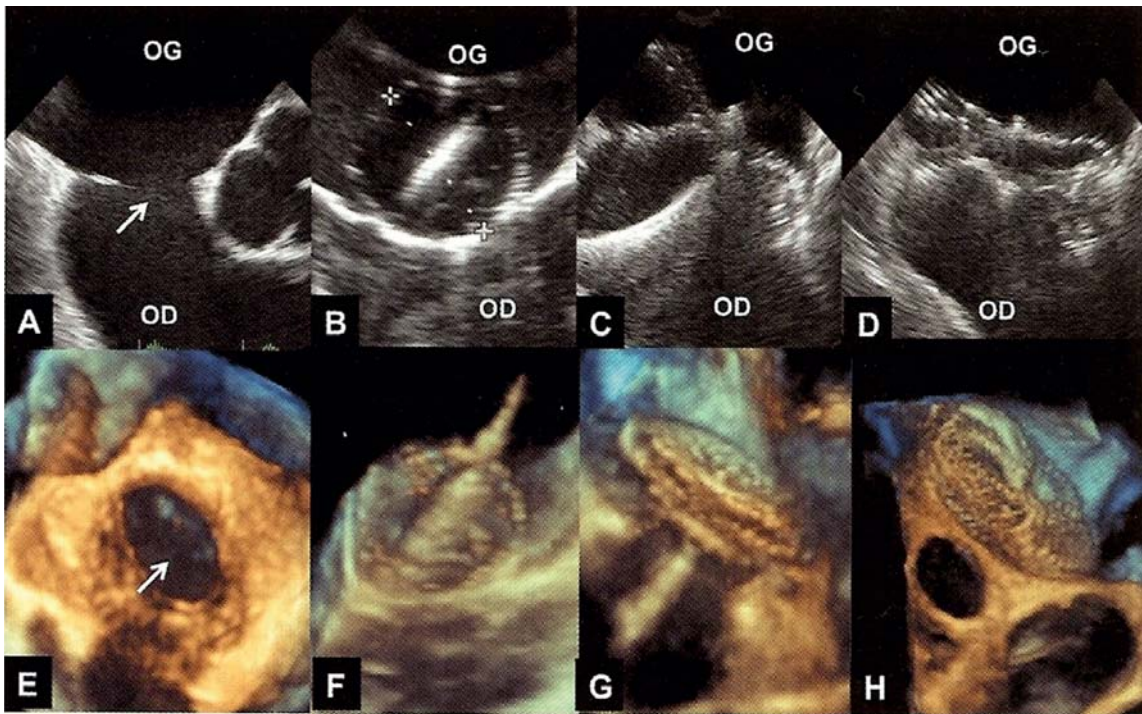


Figure 11.8. Fermeture percutanée de la communication interauriculaire (CIA).

En haut : analyse morphologique de la CIA en ETO 2D.

En bas : visualisation de la CIA, déploiement de la prothèse d'Amplatz sur le défaut septal sous contrôle d'ETO 3D.

Source : E. Brochet, *L'Écho de la Filiale*, 2010.

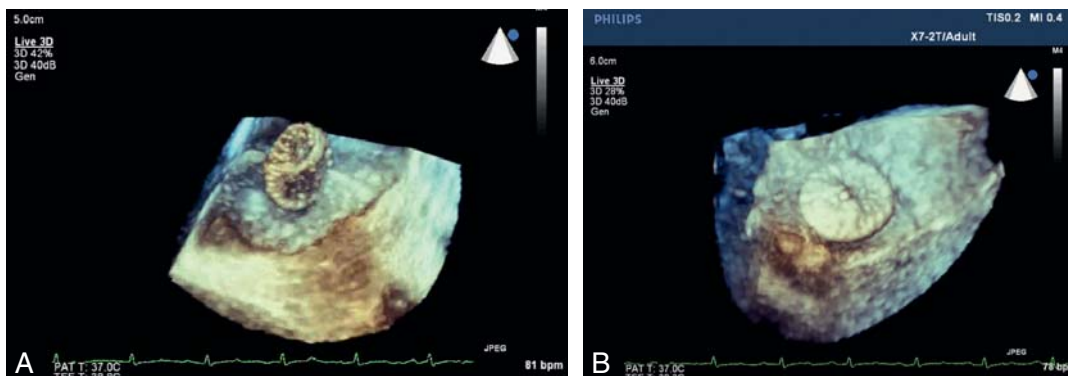


Figure 11.9. Vue de la prothèse d'Amplatz avant (A) et après (B) la fermeture de la CIA. Images en ETO 3D.

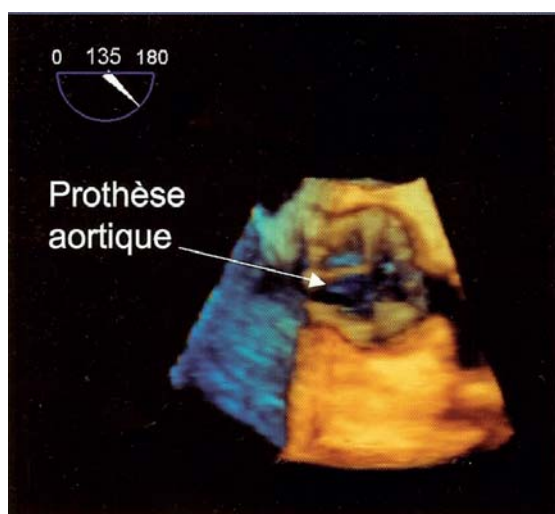


Figure 11.10. Vue en ETO 3D de la prothèse aortique implantée par voie percutanée.

Source : A. Vahanian, *Consensus Cardio*, 2008.

feuilles mitraux en corrigeant ainsi leur absence de coaptation est une alternative intéressante à la plastie mitrale chirurgicale. L'implantation du clip mitral nécessite un abord transeptal par voie veineuse fémorale.

L'ETO 3D temps réel a prouvé sa crédibilité dans la plastie mitrale percutanée à toutes ses étapes :

- avant la procédure : elle précise mieux l'importance et la localisation des zones valvulaires prolabées (cibles de l'intervention) ;
- pendant la procédure : elle permet d'abord de guider le cathétérisme transeptal et ensuite la « capture » des bords valvulaires à réparer ;

- après la procédure, elle vérifie le résultat anatomique de la réparation mitrale et l'étanchéité de la valve.

Aide de l'ETO 3D aux interventions chirurgicales

L'ETO 3D temps réel permet de guider et surveiller de nombreuses interventions chirurgicales cardiaques (remplacements ou réparations valvulaires, chirurgie aortique, correction des malformations congénitales en particulier). Le monitoring peropératoire sous ETO 3D temps réel est particulièrement utile en cas d'interventions chirurgicales complexes. Il permet une communication directe et contributive avec le chirurgien qui peut adopter immédiatement la stratégie opératoire appropriée.

Le rôle de l'ETO 3D temps réel est primordial dans la chirurgie conservatrice de la valve mitrale. L'échographie 3D permet d'évaluer la réparabilité des lésions valvulaires en cas de prolapsus mitral. Elle permet également de guider et de contrôler la plastie mitrale chirurgicale reconstructrice, ainsi que de vérifier les résultats de la plastie (étanchéité des valves, fuite mitrale résiduelle...) (figure 11.11).

Aide de l'ETO 3D à la surveillance per-interventionnelle de la fonction ventriculaire

L'ETO 3D temps réel n'est pas seulement un outil de quantification. Elle permet également de surveiller la fonction ventriculaire gauche et droite au cours

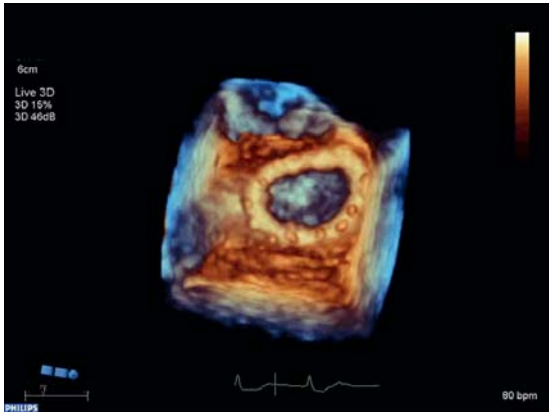


Figure 11.11. Vue en ETO 3D de l'anneau prothétique mitral placé au cours de la plastie mitrale.

des procédures percutanées ou chirurgicales. De nombreux paramètres peuvent être mesurés tels que : les volumes cardiaques (ventriculaires, atriales), la fraction d'éjection, le débit cardiaque.

Des logiciels automatisés permettent d'analyser de façon fiable et rapide la fonction globale et régionale du muscle cardiaque. Tous ces renseignements pourront sans doute contribuer à une meilleure «sécurité» et une meilleure efficacité du geste interventionnel cardiaque.

Étude ETO 3D de la crosse aortique

L'échographie 2D s'est longtemps heurtée à l'impossibilité de la visualisation complète de la crosse aortique.

L'ETO 3D temps réel s'est affranchie de cet obstacle. Elle permet une nouvelle approche «anatomique» de la crosse aortique en réduisant la «zone aveugle» de l'aorte ascendante, due à l'interposition de la trachée, comparativement à une ETO 2D classique.

Le mode biplan par rotation électronique du réseau matriciel permet d'obtenir l'incidence orthogonale de la racine aortique et ainsi la mesure précise des diamètres aortiques. L'échographie 3D est une méthode simple et efficace de diagnostic et de surveillance des anévrysmes et des dissections aortiques ainsi que du syndrome de Marfan. Seule l'échographie 3D permet d'offrir des vues endoluminales de la

coarctation aortique, très proches des descriptions anatomopathologiques.

La mesure de la surface de la zone coarctée dynamique au cours du cycle cardiaque, peut aider à un éventuel cathétérisme interventionnel (choix de la taille du ballon et/ou du stent).

Enfin, l'athérome aortique peut être aussi exploré en 3D avec des images en «relief» saisissantes.

Étude ETO 3D des prothèses valvulaires

L'analyse des prothèses valvulaires en ETO 3D temps réel possède l'impact diagnostique et clinique incontestable. Cette technique donne accès à une vue unique et immédiate de la prothèse valvulaire en rendu volumique réel (figure 11.12). Elle permet de préciser :

- l'aspect anatomique et morphologique de la prothèse;
- le fonctionnement de l'élément prothétique mobile (la cinétique des ailettes des prothèses mécaniques, la mobilité des cuspidés des bioprothèses...);
- la morphologie de la couronne prothétique (l'anneau avec les fils de suture);
- les jets de régurgitations physiologiques et pathologiques (intra ou paraprothétiques);

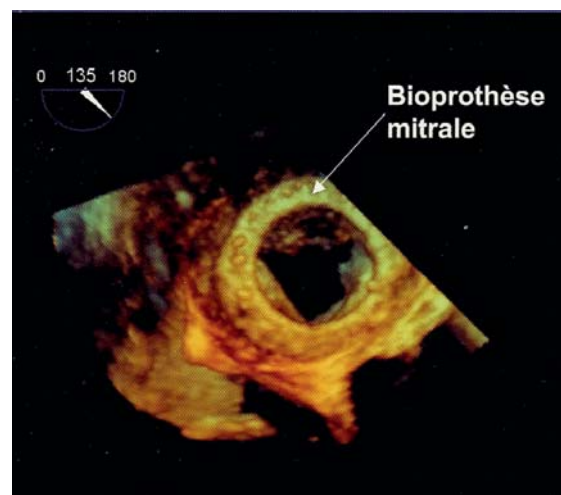


Figure 11.12. Vue en ETO 3D de la bioprothèse mitrale.

Source : E. Brochet, *Consensus Cardio*, 2008.

- les anomalies prothétiques (dysfonctionnement mécanique, désinsertion prothétique, végétations, thrombus, abcès para-prothétiques...).

L'identification de tous ces éléments prothétiques physiologiques et pathologiques est facilitée par le procédé de rotation volumique permettant de tourner en temps réel autour de la prothèse. Cependant, l'échographie 3D temps réel comporte les mêmes limitations que l'échographie 2D classique concernant les artefacts acoustiques (les « cônes d'ombre » de la prothèse) empêchant la visualisation nette de certains versants prothétiques.

Les fuites dues aux prothèses valvulaires bénéficient de l'examen 3D en mode *full volume* couplé au Doppler couleur.

Conclusions

Le développement de l'échocardiographie tridimensionnelle a longtemps été limité par la nécessité de reconstruire les images de façon différée. Une nouvelle étape d'évolution du 3D a été franchie avec l'échographie tridimensionnelle en temps réel qui existe en version clinique depuis 2004, date à laquelle est apparue la première sonde matricielle permettant une acquisition transthoracique volumique instantanée. Depuis cette date, l'échographie 3D a fait des progrès spectaculaires liés au développement des logiciels permettant une « découpe » illimitée des images et une quantification *off line*.

L'acquisition du *full volume* est devenue simple, les logiciels de calcul sont facilement embarqués dans l'échographe ou dans un ordinateur, avec traitement a posteriori des images acquises et possibilité de quantification.

Les limites de l'échocardiographie 3D en transthoracique sont en train de reculer grâce aux progrès technologiques tels que : l'amélioration des cristaux, la miniaturisation de la matrice, la qualité et la vitesse de traitement des données, l'introduction du Doppler couleur 3D, etc.

En effet, après des décennies « d'imagerie en coupes », l'échographie 3D redécouvre des images plus proches de la réalité d'un examen peropératoire ou anatomique.

Les progrès récents ont permis l'élargissement du champ d'investigation en 3D avec l'apparition des

sondes dédiées à la pédiatrie et des sondes transcésophagiennes 3D temps réel.

L'échocardiographie 3D temps réel se propage progressivement dans tous les domaines de la cardiologie depuis l'échographie pédiatrique jusqu'au guidage des procédures invasives (cardiologie interventionnelle, chirurgie cardiaque valvulaire...) en passant par les valvulopathies et les cardiomyopathies. Cette technique offre également d'importantes perspectives dans une meilleure analyse de masse, des volumes et de fraction d'éjection du ventricule gauche. La facilité d'utilisation actuelle va permettre d'étendre en routine cardiologique les applications de l'échocardiographie 3D.

Bibliographie

- Acar P, Piéchaud JF, Bonhoeffer P, et al. Évaluation anatomique des communications inter-auriculaires de type ostium secundum par échographie tridimensionnelle. *Arch Mal Cœur* 1998; 91 : 543–50.
- Acar P, Saliba Z, Bonhoeffer P, et al. Assessment of the geometric profile of the Amplatz and Cardioseal septal occluders by three-dimensional echocardiography. *Heart* 2001; 85 : 451–3.
- Acar Ph. L'Échocardiographie 3D temps réel – une révolution pour le clinicien. *Cardiologie Pratique* 2004; 693/694 : 4–8.
- Acar Ph. Échocardiographie 3D des cardiopathies congénitales. *L'Écho de la Filiale* 2010; 24 : 52.
- Aglar D, Shiota T, Tsujino H, et al. Real-time 3D echo Doppler improves spatial localization of mitral prolapse or flail : operative validation. *J Am Soc Echocardiogr* 2000; 13 : (abstract) : 430.
- Anayiotos AS, Smith BK, Kolda M, et al. Morphological evaluation of a regurgitant orifice by 3D echocardiography : application in the quantification of valvular regurgitation. *Ultrasound Med Biol* 1999; 25 : 209–23.
- Balestrini L, Fleishman C, Lanzoni L, et al. Real-time three-dimensional echocardiography evaluation of congenital heart disease. *J Am Soc Echocardiogr* 2000; 13 : 171–6.
- Bauer F, Shiota T, Quin JX, et al. Measurement of left atrial and ventricular volumes in real-time 3D echocardiography. *Arch Mal Cœur Vaiss* 2001; 94 : 31–8.
- Bauer F. L'Échocardiographie 3D. *Cardiomax* 2004; 11 : 9–12.
- Behlgravek M, Foley DA, Gerber TC, et al. Three and four dimensional cardiovascular ultrasound imaging : a new era for echocardiography. *Mayo Clin Proc* 1993; 68 : 221–40.
- Behlgravek M, Foley DA, Gerber TC, et al. Three-dimensional reconstruction of color doppler jets in the human heart. *J Am Soc Echocardiogr* 1994; 7 : 553–60.

- Berrebi A. Place de l'échocardiographie peropératoire en chirurgie valvulaire. In : *Échocardiographie clinique de l'adulte*. Ed. Estem; 2003.
- Bicudo LS. Value of real time three-dimensional echocardiography in patients with hypertrophic cardiomyopathy : comparison with two-dimensional echocardiography and magnetic resonance imaging. *Echocardiography* 2008.
- Binder TM, Rosenhek R, Porenta G, et al. Improved assessment of mitral valve stenosis by volumetric real-time three-dimensional echocardiography. *J Am Coll Cardiol* 2000; 36 : 1355–61.
- Brochet E, Messika-Zeitoun D, Lepage L, et al. Échocardiographie tridimensionnelle 3D en temps réel : modalités pratiques, applications cliniques potentielles. *Consensus Cardio* janvier 2008; 7–10.
- Brochet E. Échocardiographie 3D temps réel. Apport au cours des procédures interventionnelles percutanées. *L'Écho de la Filiale* 2010; 24 : 53–7.
- Brochet E, Lepage L, Messika-Zeitoun D, et al. 3D real time transoesophageal echocardiography in interventional cardiology. *Archives of Cardiovascular Diseases* 2011; 3(Suppl.) : 147–53.
- Chauvel C, Bogino E, Clerc P, et al. Usefulness of three-dimensional echocardiography for the evaluation of mitral valve prolapse : an intraoperative study. *J Heart Value Dis* 2000; 9 : 341–9.
- Cohen A, Meuleman C, Haddour N. 3D une technique très séduisante. *Cardiologie Pratique* 2010; 925/926 : 1–2.
- Corsi, et al. Volumetric quantification of global and regional left ventricular function from real-time three-dimensional echocardiographic images. *Circulation* 2005; 112(8) : 1161–70.
- De Castro S, Salandin V, Cartoni D, et al. Qualitative and quantitative evaluation of mitral valve morphology by intraoperative volume-rendered three-dimensional echocardiography. *J Heart Value Dis* 2002; 11 : 173–80.
- Dehant P, Bogino E, Chauvel C. L'Échocardiographie tridimensionnelle en l'an 2000. *Cardioscopie* 2001; 82 : 37–41.
- Diebold B. Principes de l'échocardiographie tridimensionnelle. *Consensus Cardio* Janvier 2008; 3–6.
- Diebold B. L'Échocardiogramme tridimensionnel trans-thoracique : une rupture technologique riche de promesses cliniques. *Cardioscopie* 2006; 110 : 25–9.
- Donal E. L'Écho 3D – une dimension qui va croissante. *Cardiologie Pratique* 2006; 766.
- Donal E. Que peut-on attendre de l'échocardiographie 3D? *Cardiologie Pratique* 2010; 918 : 4–5.
- Gopal AS, Keller AM, Shen Z, et al. Three dimensional echocardiography : in vitro and in vivo validation of left ventricular mass and comparison with conventional echocardiographic methods. *J Am Coll Cardiol* 1994; 24 : 504–13.
- Gopal AS, Schnellbaecher MJ, Shen Z, et al. Freehand three-dimensional echocardiography for measurement of left ventricular mass : in vivo anatomic validation using explanted human hearts. *J Am Coll Cardiol* 1997; 30 : 802–10.
- Hagège A, Mirochnik N, Messas E, et al. L'Échocardiographie tridimensionnelle : utopie ou outil d'avenir? *Sang Thrombose Vaisseaux* 1997; 9(2) : 99–106.
- Hagege A. Échographie tridimensionnelle. *Imagerie Médicale Cœur* 1998.
- Hagege A, Mirochnik N, Guerot C. Reconstitutions tridimensionnelles des structures cardiaques par échocardiographie. *Cardinale*; 1998, tome X, 9. P. 10–3.
- Hagege A. Approches tridimensionnelles en échocardiographie. *Cardiologie Pratique* 2000; 526 : 10.
- Hagege A. Échocardiographie tridimensionnelle. *Avancées techniques*. *Cardiologie Pratique* 2001; 578 : 2–3.
- Hagege A, Mirochnik N. Échocardiographie tridimensionnelle. In : *Échocardiographie clinique de l'adulte*. Ed. Estem; 2003. p. 125–35.
- Hagege A. Échocardiographie 3D temps réel. *La Lettre du Cardiologue* 2004; 373 : 27–30.
- Handke M, Schafer DN, Heinrichs G, et al. Quantitative assessment of aortic stenosis by three-dimensional anyplane and three-dimensional volume-rendered echocardiography. *Echocardiography* 2002; 19 : 45–53.
- Juliard JM, Aubry A, Brochet E. Échocardiographie transoesophagienne et fermeture des défauts de la cloison interauriculaire. *Consensus Cardio* Janvier 2008; 13.
- Kahlert P, Plicht B, Schenk IM, et al. Direct assessment of size and shape of noncircular vena contracta area in functional versus organic mitral regurgitation using real-time three-dimensional echocardiography. *J Am Soc Echocardiogr* 2008; 21 : 912–21.
- Kaplan SR, Basheim G, Sheehan FH, et al. Three-dimensional echocardiographic assessment of annular shape changes in the normal and regurgitant mitral valve. *Am Heart J* 2000; 139 : 378–87.
- Kasprzak JD, Nosir YFM, Roelandt JRTC. Trojwymiarowa rekonstrukcja obrazow echokardiograficznych : potencjal kliniczny i doswiadczenia wstepne. *Kardiol Pol* 1997; 46 : 515.
- Kasprzak JD, Lipiec P, Drozd J. Echokardiografia trojwymiarowa. In : *Echokardiografia*. Ed. Via. Medica; 2005. p. 76–81.
- Lafitte S, Roudaut R. Échocardiographie tridimensionnelle : bases techniques et applications cliniques. *La Lettre du Cardiologue* 2005; 382 : 25–9.
- Lee D, Fuisz AR, Fan PH, et al. Real-time three-dimensional echocardiographic evaluation of left ventricular volume : correlation with magnetic resonance imaging. A validation study. *J Am Soc Echocardiogr* 2001; 14 : 1001–9.

- Levine RA, Handschumacher MD, Sanfilippo AJ, et al. Three-dimensional echocardiographic reconstruction of the mitral valve with implications for the diagnosis of mitral valve prolapse. *Circulation* 1989; 80 : 589–98.
- Levy F, Lafitte S, Brochet E. Mémento d'échographie tridimensionnelle. *Cardiologie Pratique* Takeda, Philips, 2007.
- Levy F. Comment explorer la valve mitrale en échocardiographie transœsophagienne tridimensionnelle temps réel? *L'Écho de la Filiale* 2010; 24 : 11–7.
- Liodakis E, Al Sharef O, Dawson D, Nihoyannopoulos P. The use of real-time three-dimensional echocardiography for assessing mechanical synchronicity. *Heart* 2009; 95 : 1865–71.
- Lipiec P, Drozd J, Kasprzak JD. Echokardiografia trojwymiarowa. In : *Echokardiografia praktyczna*. Ed. Medycyna Praktyczna-Astra Zeneca, tome I; 15; 2004. p. 189–97.
- Malerque MC, Brochet E. LETO 3D temps réel. *Écho Cardiographie* 2009; 19 : 5–7.
- Maribas Ph. Qu'attendre réellement de l'échocardiographie tridimensionnelle? *Consensus Cardio* 2011; 69 : .
- Marsan NA, Westenberg JJM, Ypenburg C, et al. Quantification of functional mitral regurgitation by real-time 3D echocardiography. Comparison with 3D velocity-encoded cardiac magnetic resonance. *J Am Coll Cardiol* 2009; 2 : 1245–52.
- Messika-Zeitoun D, et al. Three-dimensional evaluation of the mitral valve area and commissural opening before and after percutaneous mitral commissurotomy in patients with mitral stenosis. *Eur Heart J* 2007; 28 : 72–9.
- Mirochnik N, Hagege A. Échocardiographie tridimensionnelle : principes possibilités, applications cliniques. *Arch Mal Cœur pratique* 1998; 73 : 19–20.
- Mor-Avi V, et al. Fast measurement of left ventricular mass with real-time three-dimensional echocardiography : comparison with magnetic resonance imaging. *Circulation* 2004; 110(13) : 1814–8.
- Mor-Avi V, Sugeng L, Lang R. Real-time three-dimensional echocardiography. An integral component of the routine echocardiographic examination in adults patients? *Circulation* 2009; 119 : 314–29.
- Nanda N, Hsiung MC, Miller AP, Hage FG. *Live / real 3D Echocardiography*. Wiley-Blackwell; 2010.
- Osama II, Soliman M. Quantification of left ventricular systolic dyssynchrony by real-time three-dimensional echocardiography. *J Am Soc Echocardiogr* 2009; 22 : 232–9.
- Ota T, Kisslo J, Von Ramm OT, et al. Real-time volumetric echocardiography : usefulness of volumetric scanning for the assessment of cardiac volume and function. *Am J Cardiol* 2001; 37 : 93–101.
- Pandian NG, Roelandt J, Nanda NC, et al. Dynamic three-dimensional echocardiography : methods and clinical potential. *Écho Cardiographie* 1994; 11 : 237–59.
- Quin JX, Jones M, Shiota T, et al. New digital measurement methods for left ventricular volume using real-time three-dimensional echocardiography : comparison with electromagnetic flow method and magnetic resonance imaging. *Eur J Echocardiogr* 2000; 1 : 96–104.
- Reant P, Lafitte S, Roudaut R. LETO 3D frappe à la porte. *Cardiologie Pratique* 2008; 832 : 12–4.
- Roelandt JRCT., Ten-Cate FJ, Vletter WB, et al. Ultrasonic dynamic three-dimensional visualisation of the heart with a multiplane transoesophageal imaging transducer. *J Am Soc Echocardiogr* 1994; 7 : 217–29.
- Roelandt JRCT. Three-dimensional echocardiography : new views from old windows. *Br Heart J* 1995; 74 : 4–6.
- Roelandt JRCT., Yao J, Kasprzak JD. Three-dimensional echocardiography. *Curr Opin Cardiol* 1998; 13 : 386.
- Salustri A, Roelandt JRCT. Three-dimensional reconstruction of the heart with rotational acquisition : methods and clinical applications. *Br Heart J* 1995; 473 (Suppl. 2) : 10–5.
- Salustri A, Becker AE, Van Herwerden L, et al. Three-dimensional echocardiography of normal and pathologic mitral valve : a comparison with two-dimensional transoesophageal echocardiography. *J Am Coll Cardiol* 1996; 27 : 1502–10.
- Scheuble C. L'Échocardiographie tridimensionnelle temps réel. *Cardiologie Pratique* 2006; 753 : 2–4.
- Schmidt MA, Ohazama CJ, Agyeman KO, et al. Real-time three-dimensional echocardiography for measurement of left ventricular volumes. *Am J Cardiol* 1999; 84 : 1434–9.
- Sitges M, Jones M, Shiota T, et al. Real-time three-dimensional color Doppler evaluation of the flow convergence zone for quantification of mitral regurgitation : Validation experimental animal study and initial clinical experience. *J Am Soc Echocardiogr* 2003; 16 : 38–45.
- Sportouch C. Analyse du SIA et recherche d'un FOP. *L'Écho de la Filiale* 2010; 24 : 7–10.
- Sugeng L, et al. Real-time three-dimensional transoesophageal echocardiography in valve disease : comparison with surgical findings and evaluation of prosthetic valves. *J Am Soc Echocardiogr* 2008; 21 : 1347–54.
- Sun JP, Merlino J, Felner J. *Practical Handbook of Echocardiography*. Wiley-Blackwell; 2010.
- Thébault Ch, Bernard A, Leclercq C, et coll. Échocardiographie 3D temps réel : une nouvelle technique dans l'évaluation de l'asynchronisme mécanique ventriculaire gauche. *L'Écho de la Filiale* 2010; 24 : 48.
- Touche T. L'Échocardiographie tridimensionnelle temps réel des valvulopathies. *L'Écho de la Filiale* 2010; 24 : 58–60.

- Vahanian A, Himbert D, Brochet E. Utilisation de l'ETO en 3D et interventions valvulaires percutanées. *Consensus Cardio* Janvier 2008; 11-2.
- Wang X, Deng Y, Nanda N, et al. Live 3D echocardiography : imaging principles and clinical application. *Echocardiography* 2003; 20(7) : 593-7.
- Xie T, Abreo M, Ahmad M. Real-time 3D dobutamine stress echocardiography in quantitative assessment of ischaemia. *Eur Heart J* 1999; (abstract) : 1600.
- Yao J, Kasprzak JD, Nosir YE, et al. Appropriate three-dimensional echocardiography data acquisition interval for left ventricular volume quantification : implications for clinical application. *J Am Soc Echocardiogr* 1999; 12 : 1053-7.
- Zamorano J, et al. Real-time three-dimensionnal echocardiography for rheumatic mitral valve stenosis evaluation. An accurate and novel approach. *J Am Coll Cardiol* 2004; 43 : 2091-6.
- Ziani AB, et al. Assessment of proximal isovelocity surface area (PISA) shape using three-dimensional echocardiography in a paediatric population with mitral regurgitation or ventricular shunt. *Arch Cardiovasc Dis* 2009; 102 : 185-91.