

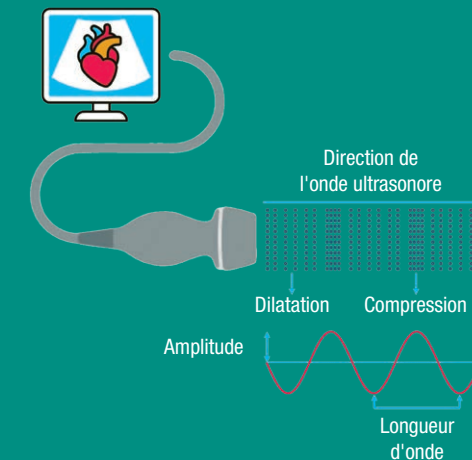
# LES PROMESSES DE L'ÉCHOGRAPHIE ULTRARAPIDE

par Damien Garcia et Olivier Villemain

L'échographie est une technique d'imagerie exploitant des ondes ultrasonores, dont la fréquence se situe au-delà de notre seuil d'audibilité (encart 1). Lorsque celle-ci est utilisée pour analyser les structures du cœur et son fonctionnement, on parle d'« échocardiographie ». En échocardiographie, une sonde composée de plusieurs dizaines de petits éléments vibrants piézoélectriques, et positionnée sur le thorax, émet de courts signaux ultrasonores en direction du cœur. Entre deux émissions, la sonde enregistre les échos réfléchis par les structures cardiaques, ainsi que par les tissus environnants et le sang. Connaissant la vitesse de propagation des ondes ultrasonores dans le corps humain (environ 1540 mètres par seconde), le temps écoulé entre l'émission et la réception d'un écho permet de déterminer la distance de la structure ayant généré cet écho. L'amplitude du signal réfléchi donne de l'information sur le pouvoir réfléchissant de la structure. À chaque écho est ainsi associée une structure du cœur ou de son environnement. L'analyse de tous les échos, de leurs distances relatives à la sonde et de leurs amplitudes permet de déduire des informations sur la localisation et la nature du milieu et donc, dans le cas de l'échocardiographie, de créer une image du cœur (figure 1).

## ENCART 1- QU'EST-CE QU'UNE ONDE ULTRASONORE ?

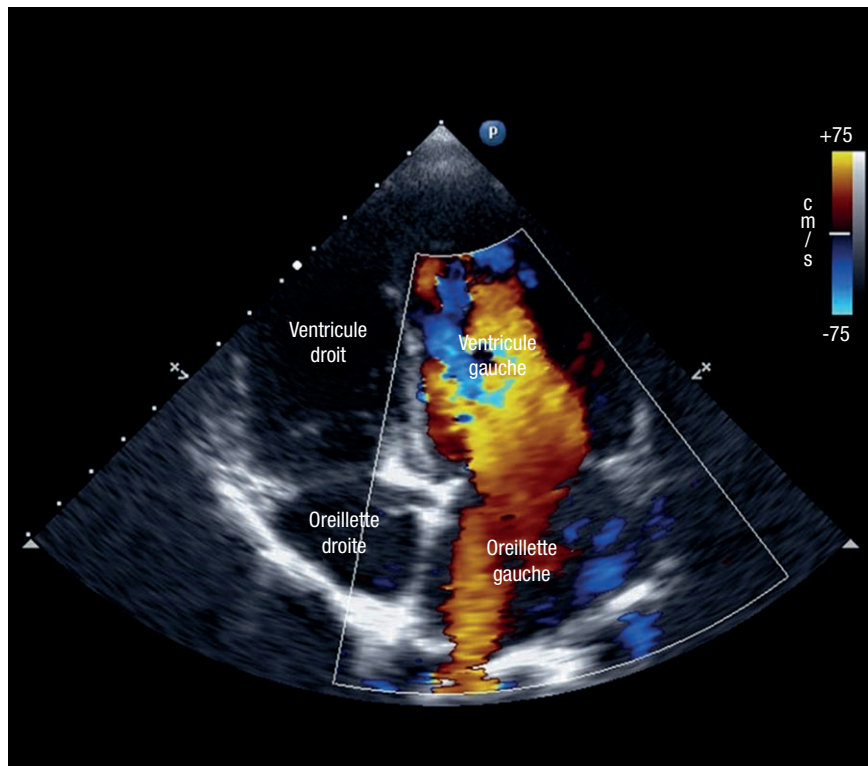
Une onde sonore est une vibration mécanique qui se propage à travers un milieu, comme l'air, l'eau ou les tissus du corps humain. Les molécules constituant le milieu oscillent autour d'un point fixe, dans la direction de la propagation, et transmettent leurs oscillations aux molécules voisines. La propagation d'une onde est par conséquent un déplacement local de matière qui se répercute de proche en proche. Telle une vague, une onde est caractérisée par sa vitesse de déplacement, son amplitude (c'est-à-dire sa hauteur), et la longueur séparant deux sommets, ou deux creux, successifs. La fréquence est définie par le rapport entre cette vitesse et cette longueur ; elle représente le nombre d'oscillations par seconde (en Hertz, Hz). Ainsi, dans un environnement donné, plus la longueur entre deux crêtes est courte, plus la fréquence de l'onde est élevée. Une onde est qualifiée d'ultrasonore si sa fréquence est au-delà de notre seuil d'audibilité, environ 20 kHz. En imagerie médicale ultrasonore, la fréquence des ondes utilisées est de l'ordre du MHz ou de la dizaine de MHz : elles oscillent plusieurs millions de fois par seconde. De telles fréquences sont utilisées afin d'obtenir des images avec suffisamment de détails permettant d'analyser les structures anatomiques explorées. Lorsque les propriétés acoustiques du milieu changent, une partie de l'onde poursuit son chemin, tandis qu'une autre est réfléchi. Tant que la partie incidente de l'onde possède suffisamment d'énergie, d'autres réflexions suivront. C'est l'analyse de ces réflexions qui permettent de générer des images.



**Propagation d'une onde ultrasonore.** Le milieu se comprime et se dilate localement, sous l'effet d'une vibration mécanique produite par la sonde ultrasonore. Ce phénomène se répercute de proche en proche, générant la propagation de l'onde.

# 1 L'échographie conventionnelle

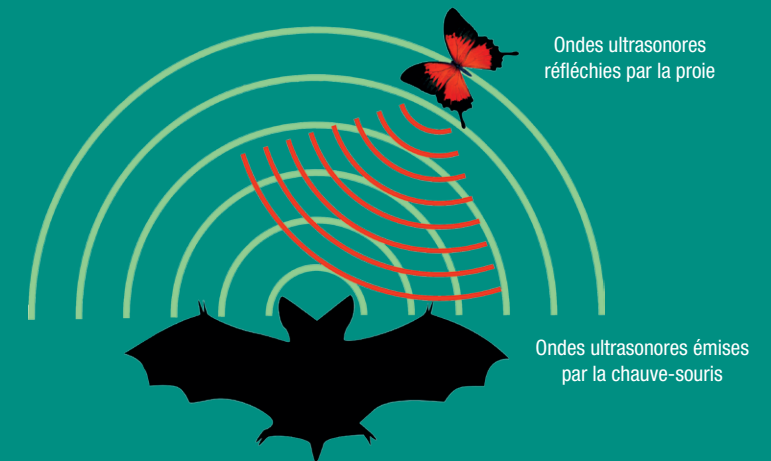
À l'instar de la focalisation optique, la focalisation ultrasonore consiste à concentrer les ondes en un point. En échocardiographie conventionnelle bidimensionnelle (2D), celle communément utilisée en clinique, un balayage commandé électroniquement permet l'émission successive de plusieurs faisceaux focalisés, dans différentes directions, dont l'ensemble



**1. Échocardiographie Doppler.** Dans une image d'échographie cardiaque, les structures en niveaux de gris représentent la paroi et les composants anatomiques du cœur. On peut distinguer ici les quatre cavités du cœur. Le flux et la vitesse du sang peuvent être examinés par le Doppler couleur, présenté dans des tons de bleu et de rouge.

## ENCART 2 - L'IMAGERIE ULTRASONORE, UNE INVENTION NON HUMAINE

L'imagerie ultrasonore consiste à produire des images à partir d'ondes ultrasonores. L'écholocation, un sonar biologique utilisé par plusieurs espèces animales, en est une version apparue il y a plusieurs dizaines de millions d'années. Les mammifères les plus populaires utilisant cette technique de sonar sont les chauves-souris et les dauphins. Ils émettent de brefs signaux ultrasonores, et captent les échos produits par les obstacles, ou les animaux situés à proximité, afin de les localiser. L'écholocation fournit à l'animal une représentation spatiale et temporelle de son environnement, pour la navigation et la chasse. Le principe physique est relativement simple. La distance d'un obstacle, ou d'un animal, est déterminée par le temps écoulé entre l'émission du son et la réception de l'écho. La direction de la cible est déduite en mesurant le décalage des signaux perçus par plusieurs récepteurs (les deux oreilles des chauves-souris par exemple). Certaines chauves-souris sont aussi capables de déterminer la vitesse de leurs proies en modulant la fréquence des signaux émis. Bien que les techniques utilisées diffèrent, les distances, les directions et les vitesses des composantes anatomiques sont également des caractéristiques qui peuvent être évaluées en imagerie médicale par ultrasons.



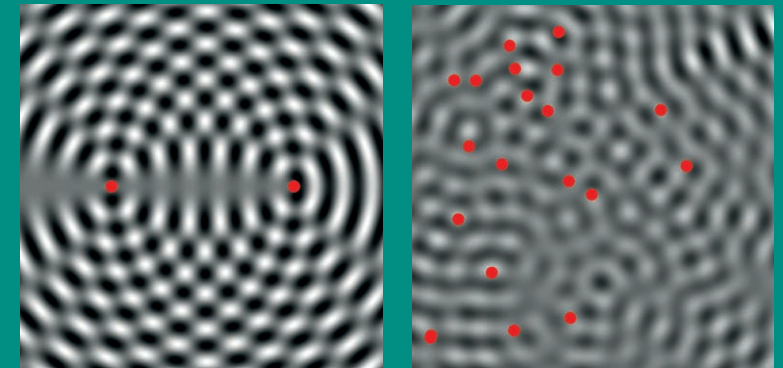
**Écholocation animale.** L'écholocation est un sonar naturel. L'animal émet une onde sonore qui ricoche sur un objet, ou une proie. Le signal réfléchi, c'est-à-dire l'écho, renseigne sur sa taille et la distance à laquelle il se trouve. Le sonar sous-marin et l'imagerie ultrasonore utilisent un principe similaire.

couvre entièrement la partie du cœur que le cardiologue souhaite visualiser. La propagation des ondes étant très rapide, et l'analyse des échos étant relativement simple d'un point de vue électronique et informatique, la formation des images du muscle cardiaque peut être effectuée à une cadence de 25 à 100 images par seconde, selon la profondeur d'acquisition des images. De surcroît, un appareil échocardiographique peut être réduit à la taille d'un ordinateur ou d'un téléphone. L'imagerie ultrasonore est ainsi la seule modalité d'imagerie médicale portable, capable de fournir des informations sur un organe, et sur son mouvement, en temps réel. L'énergie des ondes acoustiques utilisées est de plus sans danger pour l'organisme, contrairement aux rayons X par exemple. Ces particularités font de l'échographie l'imagerie médicale la plus utilisée en cardiologie clinique. Avec le perfectionnement des outils de reconstruction d'images, et les progrès dans le domaine informatique, on obtient des images échographiques de plus en plus détaillées et contrastées (figure 1).

Outre l'analyse anatomique du cœur, l'échocardiographie permet la mesure des vitesses de sa paroi ou celles du sang. On parle alors d'« échocardiographie Doppler », en référence à l'effet Doppler. À titre d'exemple, une vitesse anormale du muscle cardiaque lors de sa relaxation peut aider à identifier une dysfonction cardiaque. Une vitesse élevée du sang à la sortie du cœur est, quant à elle, généralement le signe d'une obstruction localisée appelée « sténose aortique ». L'échocardiographie Doppler permet aussi d'obtenir une cartographie de l'écoulement sanguin dans les cavités cardiaques. Ce mode d'utilisation, communément appelé « Doppler couleur », utilise une palette de couleurs rouge et bleu associées au flux sanguin (figure 1). Comme pour l'imagerie du muscle cardiaque, le Doppler couleur conventionnel nécessite un balayage des tirs focalisés pour couvrir la zone sanguine à analyser. Par contre, la méthode Doppler nécessite de répéter ces émissions plusieurs fois, au même endroit, pour pouvoir estimer les vitesses locales. Par conséquent, en échocardiographie 2D conventionnelle, seules 10 à 20 images Doppler par seconde peuvent être obtenues. Bien que limitée pour une étude approfondie de la dynamique du flux intracardiaque, cette cadence permet néanmoins au cardiologue d'avoir un aperçu de l'écoulement et de détecter une éventuelle pathologie.

### ENCART 3 - L'IMAGE MÉDICALE ULTRASONORE OU ÉCHOGRAPHIE

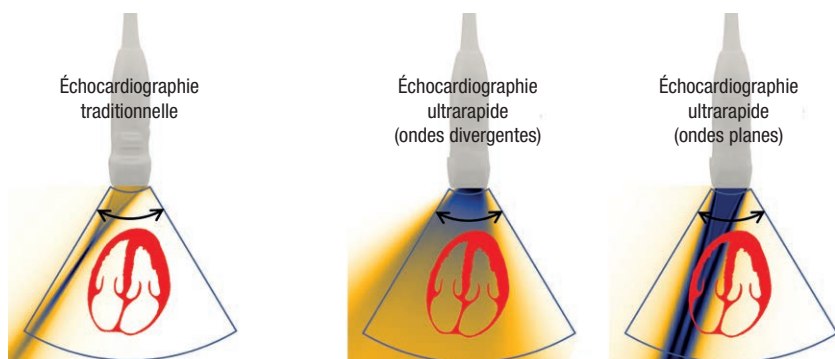
Les premières applications humaines de l'imagerie ultrasonore furent essentiellement militaires, durant la première guerre mondiale, avec l'utilisation du sonar sous-marin. Les premières images ultrasonores à caractère médical furent publiées, en 1947, par les frères autrichiens Dussik, neurologue et physicien. Mais c'est l'Américain d'origine britannique, John Wild, qui est considéré comme le précurseur de l'échographie diagnostique. Il s'est intéressé à l'utilisation des ultrasons pour détecter des tumeurs et des calculs, et a publié la première image échographique en deux dimensions en 1952. Les longueurs d'onde utilisées en imagerie médicale ultrasonore sont de l'ordre de quelques dixièmes de millimètre. Les surfaces réfléchissantes des organes sont extrêmement rugueuses à l'échelle de ces longueurs d'onde. Les images ultrasonores résultant des multiples réflecteurs ont alors un aspect granuleux dû à des phénomènes d'interférence. De telles interférences peuvent être observées en jetant une poignée de cailloux dans une eau limpide. Certaines ondes s'additionnent de manière constructive, c'est-à-dire les sommets d'une onde se combinent avec les sommets d'une autre onde. D'autres ondes, au contraire, s'annihilent, c'est-à-dire les sommets d'une onde se combinent avec les creux d'une autre onde.



**Interférences d'ondes.** L'interférence est un phénomène dans lequel deux ondes de même nature se rencontrent et interagissent l'une avec l'autre. Elles se superposent pour former une onde résultante de plus grande, plus petite ou de même amplitude. En imagerie médicale ultrasonore, plusieurs ondes interfèrent.

## 2 L'échographie ultrarapide

C'est essentiellement la méthode d'émissions focalisées qui limite le nombre d'images par seconde. Celle-ci a l'avantage de condenser l'énergie acoustique par la formation de faisceaux étroits et favorise la création d'images de qualité. Elle requiert néanmoins un balayage de plusieurs dizaines d'ondes focalisées pour couvrir le milieu et créer une seule image. Le récent essor d'unités de calcul avancées (processeurs graphiques), ainsi que la commercialisation de machines ultrasonores programmables et dédiées à la recherche, ont permis d'ouvrir de nouvelles perspectives en imagerie médicale ultrasonore. Il est désormais possible d'obtenir des centaines, voire des milliers d'images par seconde. Cette résolution temporelle est actuellement inégalée dans le domaine de l'imagerie médicale. Plutôt que de se limiter à des émissions d'ondes focalisées formant de fins faisceaux, le principe consiste à émettre des ondes à large front couvrant une grande partie voire la totalité de la région à imager. Une fois l'onde émise, la sonde reçoit des échos provenant de multiples sources espacées qu'il faut savoir différencier pour créer une image exploitable. Une telle image peut être réalisée en calculant tous les chemins parcourus par les ondes,



**2. Échocardiographies conventionnelle et ultrarapide.** L'échocardiographie conventionnelle utilise des ondes étroites et focalisées qui balaient la zone du cœur à examiner. L'échocardiographie ultrarapide peut être réalisée à l'aide d'ondes larges divergentes, couvrant une grande surface du cœur. Il est également possible d'utiliser des ondes planes.

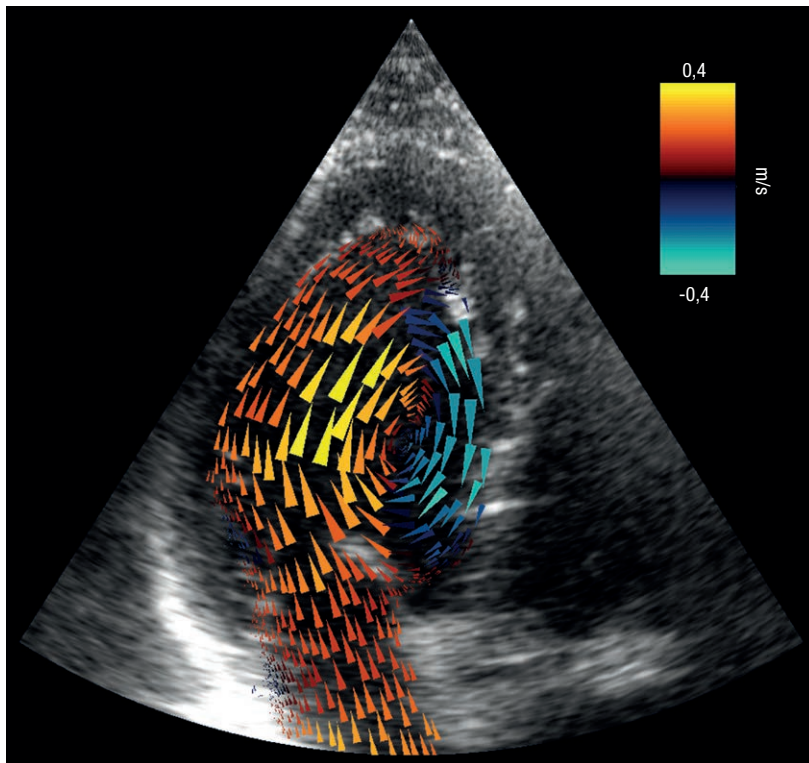
au départ de la sonde ultrasonore, jusqu'à une structure anatomique réfléchissante, puis de retour vers les éléments piézoélectriques de la sonde. Le principe est similaire à celui de l'imagerie sismique par réflexion pour l'observation des structures géologiques terrestres en profondeur.

L'imagerie ultrasonore à très haute cadence, basée sur des émissions non focalisées, est appelée « imagerie ultrasonore ultrarapide » (figure 2). L'imagerie ultrasonore ultrarapide est appliquée dans tous les domaines de la médecine (cardiologie, neurologie, hépatologie, oncologie, etc.) dans le but de valoriser des phénomènes ou paramètres inexplorés et d'améliorer ainsi nos capacités de diagnostic. Cette technique est particulièrement pertinente pour le cœur, qui est l'organe présentant les mouvements les plus amples et les plus rapides, tant pour son muscle que pour le sang qu'il éjecte. La cadence obtenue en échocardiographie standard est adaptée à un examen de l'anatomie du muscle cardiaque et de son mouvement au repos. Elle est néanmoins généralement insuffisante si le rythme cardiaque est élevé, naturellement chez le jeune enfant, ou par un exercice physique chez l'adulte. Aussi, à cause de la cadence limitée de la méthode Doppler standard, une étude exhaustive de la dynamique du muscle cardiaque avec, simultanément, celle de l'écoulement sanguin intracardiaque, n'est pas possible avec les émissions de faisceaux focalisés. En revanche, l'utilisation de fronts d'onde non focalisés peut porter leur cadence jusqu'à 100 fois la cadence conventionnelle.

## 3 Les applications de l'échographie ultrarapide

L'imagerie ultrasonore ultrarapide permet ainsi d'étudier des événements très rapides et très courts. Ce potentiel a ouvert de nouvelles percées en termes d'applications cliniques. Certaines recherches sont, par exemple, dédiées à l'étude du tourbillon sanguin qui se forme dans le cœur lorsqu'il se remplit. Visualiser et quantifier ce tourbillon pourraient améliorer l'évaluation de la fonction cardiaque, c'est-à-dire sa capacité à se remplir ou à éjecter du sang. Dans un cœur normal, durant son remplissage, il se forme un large tourbillon qui occupe la quasi-totalité de la cavité intracardiaque. Celui-ci tourne de telle sorte qu'il facilite la redirection du sang

vers la sortie du cœur (figure 3). Un tourbillon efficace assure alors le lien entre le remplissage du cœur et sa vidange, et, par conséquent, garantit la bonne fonction de la pompe cardiaque. En revanche, un vortex anormal indique que la pompe cardiaque est altérée. En parallèle, une analyse du muscle cardiaque peut aider à identifier les causes de cette dysfonction cardiaque. Une approche utilisée est la mesure des déformations régionales du muscle cardiaque. Bien que l'imagerie de déformations cardiaques puisse être réalisée avec l'échocardiographie standard (ondes focalisées),



**3. Un tourbillon dans le cœur.** Un tourbillon (vortex) de sang se forme lorsque le cœur se remplit. Il peut être visualisé par Doppler couleur en utilisant des techniques de reconstruction spécialisées. L'évolution et les propriétés de ce vortex nous renseignent sur la capacité du cœur à se remplir correctement.

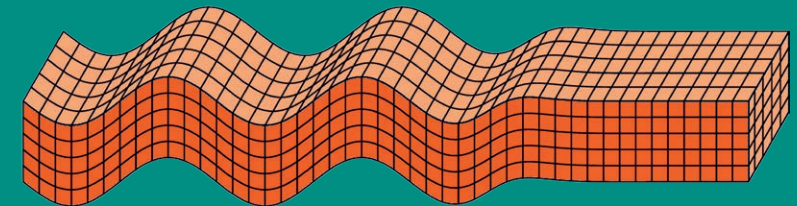
#### ENCART 4 - ONDES DE COMPRESSION ET ONDES DE CISAILLEMENT

Dans une onde élastique, telles que les ondes de compression et les ondes de cisaillement, les particules déplacées reviennent à leur position initiale. Dans les ondes de compression, le mouvement des particules se fait dans la direction de la propagation, tandis que dans les ondes de cisaillement, il est perpendiculaire à la direction de la propagation. Une image ultrasonore est générée en créant des ondes de compression avec une sonde ultrasonore, et en enregistrant les composantes réfléchies par les particules du milieu insonifié. Dans certains cas, des ondes de cisaillement peuvent également être créées. Ces ondes de cisaillement sont plus lentes (de l'ordre du mètre par seconde dans le corps humain) que les ondes de compression (de l'ordre du kilomètre par seconde). La propagation de ces ondes de cisaillement peut alors être suivie par échographie ultrarapide. La mesure de leurs vitesses fournit des informations sur la nature du milieu à travers lesquels elles se propagent.

Onde de compression



Onde de cisaillement



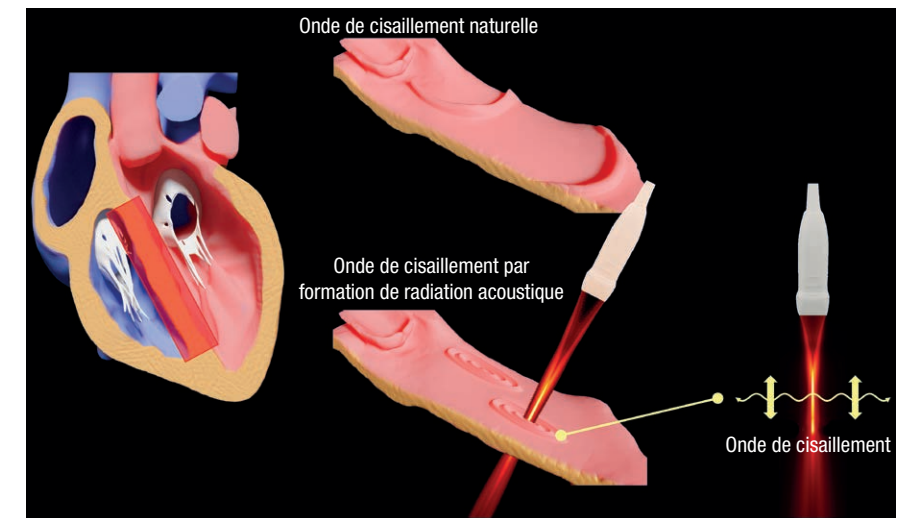
**Onde de compression et onde de cisaillement.** Les ondes dites « élastiques » comprennent les ondes de compression et les ondes de cisaillement. Dans les ondes de compression, le mouvement du milieu se déroule dans le sens de la propagation. Dans les ondes de cisaillement, celui-ci est perpendiculaire à la direction de la propagation.

les hautes cadences offertes par l'imagerie ultrasonore ultrarapide (ondes non focalisées) élargissent le champ des phénomènes pouvant être visualisés et analysés.

Une autre application de l'échocardiographie ultrarapide, relative au muscle cardiaque, est l'évaluation de la rigidité du cœur par la mesure de vitesse d'une onde de cisaillement (encart 4), qui se propage de manière suffisamment lente pour pouvoir être visualisée par imagerie ultrasonore ultrarapide. La vitesse d'une onde de cisaillement est liée à la rigidité du milieu dans lequel elle évolue. Plus ce milieu est rigide, plus l'onde de cisaillement est rapide. Ainsi, au niveau cardiaque, une rigidité trop élevée est souvent associée à une pathologie. La possibilité offerte par l'échocardiographie ultrarapide de mesurer la rigidité du muscle cardiaque, nous permet donc de mieux dépister et évaluer certaines maladies cardiovasculaires. Les ondes de cisaillement peuvent être naturelles (produites par le mouvement des structures cardiaques), mais elles sont non contrôlées. Elles peuvent être alors préférentiellement induites par une stimulation extérieure, comme une brève onde de compression ultrasonore de forte énergie. Elle produit un microdéplacement local du tissu cardiaque à l'origine d'une onde de cisaillement. Quelle que soit la source de l'onde de cisaillement, c'est bien l'imagerie ultrarapide qui permet sa visualisation et l'analyse de sa vitesse de propagation (figure 4).

L'échographie est la seule imagerie médicale fonctionnant en temps réel. Sa version ultrarapide est récente, et ses applications cliniques potentielles n'ont pas encore été pleinement explorées. Cette nouvelle technique d'imagerie nécessite de stocker, et d'analyser de concert, les nombreux échos de retour après le passage d'ondes larges émises par la sonde ultrasonore. À partir de ces échos, il s'agit de calculer les positions des réflecteurs, ainsi que leur pouvoir réfléchissant, pour générer une image. L'un des enjeux de l'échocardiographie ultrarapide est de construire des centaines, voire des milliers, d'images médicales de haute qualité par seconde. La miniaturisation des composants électroniques et l'évolution exponentielle des capacités des unités de calcul rendent désormais cette tâche possible. Aussi, l'utilisation de l'intelligence artificielle permettra d'augmenter encore la cadence et la qualité des images au moyen de techniques de reconstruction avancées. De nombreux chercheurs se consacrent à cette problématique. Ces avancées technologiques devraient permettre un suivi et un diagnostic plus précoces et plus précis des patients atteints d'une maladie cardiaque.

Outre l'analyse approfondie des flux intracardiaques et des propriétés du muscle cardiaque, l'échocardiographie ultrarapide favorisera également l'usage de l'imagerie tridimensionnelle, qui est actuellement limitée par une fréquence d'images très faible. L'échocardiographie ultrarapide permettra d'aller au-delà de cette limite inhérente aux émissions ultrasonores focalisées. Certaines recherches sont également axées sur l'étude de l'écoulement sanguin à l'intérieur même de la paroi du muscle cardiaque. Les récentes innovations en matière d'échocardiographie ultrarapide offrent des perspectives qui ne peuvent être fournies par d'autres modalités d'imagerie médicale. Sa rapidité, son renouveau et sa portabilité impliquent que l'échographie conservera son statut d'imagerie médicale de choix pour les examens des maladies cardiovasculaires.



**4. Des ondes de cisaillement dans le cœur.** Des ondes de cisaillement sont naturellement générées par le cœur. Elles peuvent aussi être produites par une force de radiation acoustique. Les deux figures centrales schématisent les ondes de cisaillement dans une « tranche » de septum, partie du muscle cardiaque qui sépare les ventricules gauche et droit (rectangle dans l'image de gauche). Les ondes de cisaillement, naturelles ou créées, sont représentées par des vaguelettes. La mesure de la vitesse de ces ondes de cisaillement, à l'aide de l'échographie ultrarapide, renseigne le clinicien sur la rigidité locale du cœur.