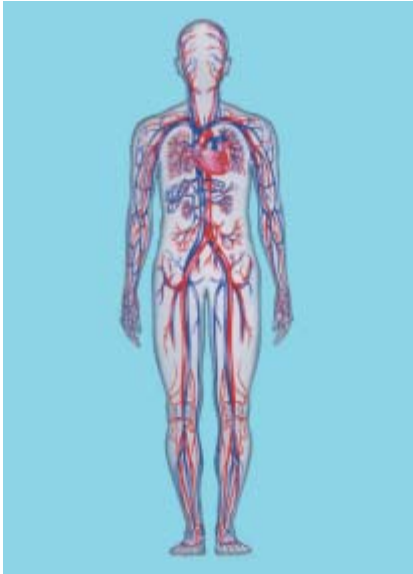




Des ondes dans les artères

ROLAND LEHOUCQ • JEAN-MICHEL COURTY

L'étude de la façon dont les ondes se propagent dans un tuyau souple révèle l'importance de l'élasticité artérielle.

Le sang est avant tout un liquide qui se déplace dans un tuyau, et le pouls un onde qui s'y propage. Pour schématiser ce point de vue de physicien, il a l'intérêt de révéler les grandes contraintes que subit le système cardio-vasculaire. Les risques que signifie le vieillissement des artères deviennent alors plus clairs.

UN RÉSEAU COMPLEXE

Le système vasculaire d'un adulte est un réseau de tubes dans lesquels circulent environ cinq litres de sang. Envoyé dans les artères, le sang traverse les vaisseaux capillaires avant de revenir au cœur par les veines. Les capillaires irriguent les organes; ils sont donc fins et nombreux, d'un diamètre compris entre 5 et 10 micromètres. L'écoulement d'un liquide visqueux à travers des tubes aussi petits ne se fait pas sans résistance. Pour que le sang circule quand même, la pression à l'entrée des capillaires – la pression artérielle – doit

être supérieure à la pression à la sortie des capillaires – la pression veineuse.

C'est la pompe cardiaque qui assure cette différence. Le cycle qu'elle suit alterne des phases pendant lesquelles le débit sortant est nul (le cœur se gonfle), et des phases pendant lesquelles le débit est maximal (le cœur se contracte). Le liquide vital ne circule donc pas en continu : il est remis en mouvement à chaque pulsation, de sorte que la pression artérielle, elle aussi, suit des variations périodiques. Elle augmente lorsque le cœur se contracte et diminue quand il se gonfle.

Pour nous aider à étudier la circulation du sang, examinons au préalable une situation plus simple : la mise en mouvement d'un fluide au repos dans un tube rigide. Le contenu d'une canalisation domestique, par exemple, ne se met pas en mouvement instantanément. L'ouverture d'un robinet se ressent avec retard à une extrémité éloignée, parce qu'une onde de pression doit d'abord se propager. Tout comme le son, cette onde est

une onde de pression longitudinale, qui transmet de proche en proche les modifications de pression.

LE COUP DE BÉLIER

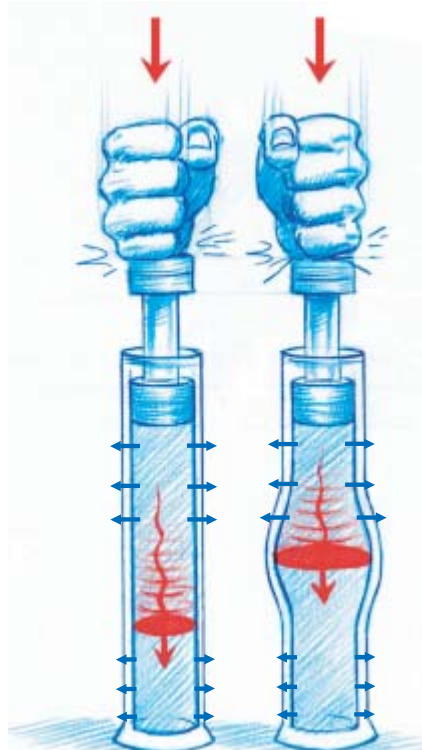
Un phénomène souvent observé met en évidence plusieurs des propriétés des ondes longitudinales de pression. Avez-vous déjà lutté contre la manette d'un vieux robinet grippé? La main veut lui imprimer un mouvement de rotation, auquel elle résiste, avant de céder brusquement. Nous ressentons alors un choc dans le bras. Un bruit se fait entendre, saccadé, comme si quelqu'un tapait au marteau quelque part sur la canalisation. Que s'est-il passé? Âgé, donc desséché, le joint en caoutchouc s'est raidi, de sorte qu'il se décolle d'un seul coup à l'ouverture du robinet. L'eau se met alors à couler et nous ressentons un choc : «le coup de bélier». L'écoulement soudain d'un liquide crée une dépression, laquelle se propage dans le réseau sous la forme d'une onde de choc, qui va jusqu'à un endroit où elle se réfléchit (coude, jonction entre tuyaux, etc.) Ces réflexions se font en cascade, c'est-à-dire que l'onde réfléchie revient au robinet, rencontre le joint, le recolte, ce qui provoque un nouveau choc, etc. Il en résulte un bruit répété. Dans certaines conditions, par exemple lorsque le robinet est entrouvert, sa fermeture engendre une nouvelle onde, dont l'existence se traduit par l'émission d'une succession de coups sourds ou d'un son grinçant. Toutes ces péripéties contrastent avec la facilité qui accompagne l'ouverture d'un robinet neuf. La souplesse du joint assure une variation de pression progressive, laquelle évite tout choc.

Lors de la propagation, la variation de pression due à l'onde est égale au produit de la vitesse de déplacement du fluide par la racine carrée du rapport entre la masse volumique et la compressibilité



Dessins de Bruno Vacaro

Avez-vous déjà ouvert un robinet grippé? Vous forcez, puis brusquement il cède. Une bruyante onde de choc se propage alors dans la canalisation et dans votre bras : le coup de bélier.



Dans un fluide incompressible, une onde de pression se propage plus lentement dans un tube souple (à droite) que dans un tube rigide (à gauche). La surpression créée par l'onde est inférieure si les parois du tube sont souples. La nature a mis à profit cette propriété pour éviter les pressions artérielles élevées, nocives pour nos tissus, et fatigante pour le muscle cardiaque.

du fluide. La masse volumique caractérise l'inertie du fluide, c'est-à-dire sa résistance à un changement de vitesse. Ainsi, plus le fluide est inerte et plus la pression nécessaire pour lui faire acquérir une vitesse donnée est grande. La compressibilité mesure la variation relative de volume du fluide en fonction de la pression à laquelle il est soumis. Plus elle est faible et plus le fluide est «rigide». Rappelons que les corps les plus compressibles sont les gaz : si l'on part de la pression et de la température ambiante,



Le pouls parvient au cou environ un dixième de seconde plus tôt qu'au poignet.

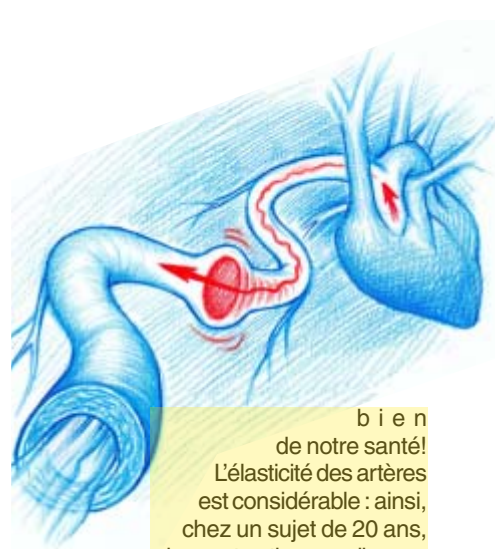
le volume d'une masse d'air est divisé par deux si l'on double la pression. Les liquides, en revanche, sont très peu compressibles. L'eau l'est 15 000 fois moins que l'air!

Autre aspect important, la vitesse de propagation de l'onde de pression est égale à l'inverse de la racine carrée du produit de la masse volumique et de la compressibilité. Un fluide de faible masse volumique, donc peu inerte, ou faiblement compressible, donc très rigide, propagera rapidement les ondes. Dans l'air, la vitesse d'une onde de pression (celle du son) atteint 340 mètres par seconde; elle est de près de 1 500 mètres par seconde dans l'eau. Ces valeurs sont relativement proches, ce qui surprend si l'on pense, par exemple au facteur 15 000 qui sépare la compressibilité de l'eau de celle de l'air. Nous avons bien là l'illustration du fait que même si l'air est compressible comparé à l'eau, il est aussi 800 fois moins dense.

DES TUYAUX SOUPLES

En quoi ces problèmes de robinets nous aident-ils à comprendre la circulation sanguine? L'injection du sang dans les artères est tout à fait comparable à l'ouverture périodique d'un robinet d'alimentation qui relierait le réservoir sous pression qu'est le cœur au réseau de canalisations que sont les artères. À la sortie du cœur, la vitesse du sang dans l'artère aorte varie entre zéro et un mètre par seconde de 40 à 180 fois par minute, selon le pouls. Dans un tuyau rigide, il faudrait faire varier la pression d'injection d'environ une demie atmosphère (0,5 bar) pour induire de telles variations de vitesse. Une telle valeur est bien au dessus de ce que peuvent supporter les tissus artériels, et ne pourrait être fournie par le cœur. Un problème que la nature a astucieusement contourné grâce à la souplesse des artères et à leurs diamètres variables.

Lorsque la pression augmente, en effet, la masse contenue dans une certaine longueur de tube rigide n'augmente que si le fluide se comprime. Dans un tube dont la paroi se déforme, la masse contenue dans la longueur augmente sans problème, même si le fluide est incompressible. Aux extrémités d'un tube souple contenant un fluide peu compressible (le sang), tout se passe en fait comme si le même tube était rigide et contenait un liquide d'une certaine compressibilité. Laquelle? Celle que devrait avoir le liquide qui courrait dans des artères supposées rigides serait de près de dix mille fois plus grande que celle du sang. Elle serait plus proche de celle de l'air que de celle de l'eau! Les artères souples que préfère la nature permettent une pression sanguine cent fois plus faible qu'elle ne devrait être si nos artères étaient rigides. Pour le plus grand



bien de notre santé! L'élasticité des artères est considérable : ainsi, chez un sujet de 20 ans, les contractions cardiaques augmentent de 50 pour cent le volume de l'aorte.

Qu'en est-il de la vitesse de propagation des ondes dans des artères souples? Elle aussi, est réduite d'un facteur de cent, de sorte que la vitesse du pouls est d'environ dix mètres par secondes. Pour le constater, prenez simultanément votre pouls au cœur et au cou, puis au cou et au poignet. Quasi immédiate au cou, l'arrivée du pouls au poignet est retardée par la distance à franchir (environ un mètre). Le délai qui sépare les deux pouls est d'environ un dixième de seconde.

Avec le temps, les artères se rigidifient : c'est l'artériosclérose. Ainsi, l'augmentation relative du volume aortique est souvent quatre fois plus faible chez un sujet de 60 ans, que chez un jeune adulte. La pression aortique augmente donc chez les personnes âgées, ce qui multiplie les risques de rupture d'une artère. Contraint d'assurer une pression plus élevée, le cœur fatigue plus. Un remède mécanique existe pour les cas extrêmes. Un chirurgien introduit un ballonnet rempli d'air dans l'aorte. Son rôle est de diminuer quand le volume occupé par le sang augmente et de gonfler quand il diminue, de sorte qu'au final la pression artérielle est maintenue sans surpression aortique. Cette technique exige toutefois une bonne surveillance. C'est pourquoi, le ballonnet est relié à un appareil externe, lequel contrôle ses variations de volume.

Roland LEHOUCQ est astrophysicien au Service d'astrophysique du CEA. **Jean-Michel COURT** est chargé de recherche au CNRS et travaille au laboratoire Kastler-Brossel (CNRS, ENS, UPMC).

Blood flow in arteries, Donald A. McDonald, (Edward Arnold, London 1960).

Waves in Fluids, James Lighthill, (Cambridge University Press, 1978).

http://www.fedecardio.com/votre_cœur/index.htm



Maurice Mattauer

Schiste et camisard

MAURICE MATTAUER

Dans un tableau, les guerres de religion du début du XVIII^e siècle se superposent à l'affrontement de deux plaques tectoniques.

Le tableau *Les héros de la liberté de conscience* (voir page ci-contre), de Michel Leenhart (1853-1941), exposé au musée du Désert, à Mialet dans le Gard, évoque la triste guerre des Camisards qui sévit, entre 1702 et 1710, dans le pays Cévenol. Le nom de camisard vient du mot languedocien *camiso* qui signifie chemise : une chemise blanche était le signe de reconnaissance des protestants durant leurs attaques nocturnes contre les soldats du roi. La scène représente un

pasteur prêchant devant une assemblée de protestants qui avaient l'habitude de se réunir secrètement dans les montagnes pour y pratiquer leur religion alors interdite, tels les juifs chassés qui se retrouvaient dans le Désert. Cet épisode biblique a donné son nom à l'époque et au Musée. Si le tableau rappelle aux historiens un affrontement entre les protestants et les forces du roi Louis XIV – les célèbres dragons – après la révocation de l'Édit de Nantes, elles rappelle aussi, à ceux qui

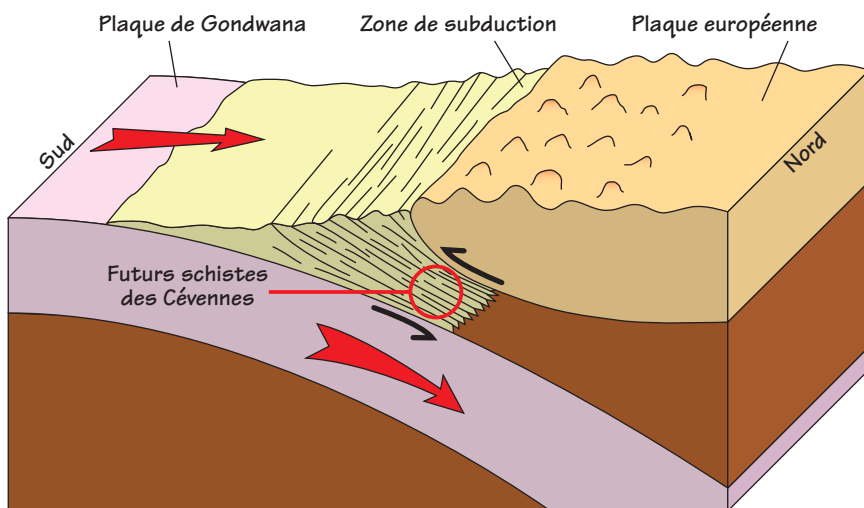
connaissent un peu les pierres et les paysages de la région, un événement de première grandeur, mais de toute autre nature, puisqu'il est géologique et qu'il a eu lieu il y a environ 350 millions d'années.

Pour le mettre en évidence, regardons les blocs rocheux de la peinture, et en particulier celui sur lequel s'appuie le pasteur, et plus à droite, le bloc allongé sur lequel est assis un camisard coiffé d'un chapeau.

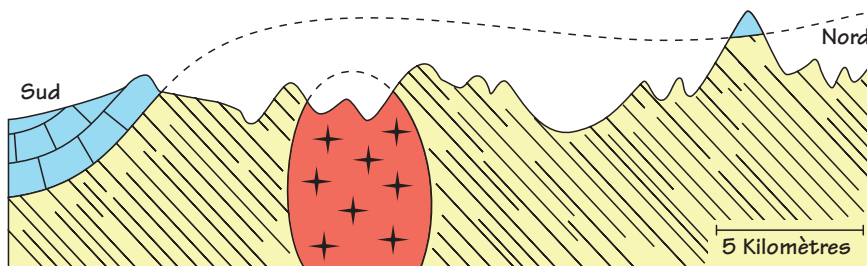
Un dicton régional dit que «le schiste est protestant, le calcaire est catholique» («schisme» n'est linguistiquement pas très loin de «schisme»). Ne nous étonnons donc pas que la roche ne soit pas massive comme un granite. Elle a plutôt un aspect et un débit feuilleté ; il s'agit de schistes tel qu'il s'en forme couramment lorsqu'une épaisse pile de sédiments marins, déposée sur la bordure d'un continent, est entraînée en profondeur dans ce que l'on nomme une zone de subduction, et s'enfonce sous un autre continent. Les sédiments, alors comprimés, sont fortement déformés. Suite à l'augmentation de température, ils recristallisent et changent d'aspect : on obtient des roches dites métamorphiques. L'intensité de ce métamorphisme varie selon la température : aux plus basses, les roches sont des ardoises, parfois exploitables, aux plus hautes, ce sont des micaschistes qui contiennent de fines paillettes de mica.

Dans les Cévennes, les sédiments, qui atteignaient plus de cinq kilomètres d'épaisseur, étaient constitués de particules argileuses fines sous forme de vase et de boue, en alternance avec des niveaux sableux. Lorsque la température atteint 300 à 400 degrés, vers dix kilomètres de profondeur, la roche acquiert une structure feuilletée, d'origine mécanique, que les géologues nomment schistosité.

En examinant les différents blocs, leur débit schisteux est évident, mais on remarque aussi que l'inclinaison de la schistosité varie d'un bloc à l'autre : les blocs ont donc été basculés. Dans le bloc allongé, à droite, sous le camisard au chapeau, l'inclinaison de la schistosité est faible (environ 30 degrés). En revanche, le pasteur s'appuie sur un bloc où la schistosité est presque verticale.



1. LA PLAQUE DE GONDWANA (en rose), en s'enfonçant sous la plaque européenne (en orange) dans une zone de subduction, a entraîné une pile de sédiments (en jaune) qui s'étaient déposés au fond de l'océan. Sous la pression des deux plaques et à la température qui règne en profondeur (300 à 400 °C), ces sédiments ont acquis une structure feuilletée et sont devenus des schistes qui formeront, après érosion, les Cévennes.



2. LES CÉVENNES, dont la coupe est ici schématisée, s'étendent du Sud-Est du Massif Central jusqu'à la vallée du Rhône. Cette région est principalement composée de schistes (en jaune) formés à partir de dépôts marins, âgés de 400 à 550 millions d'années, qui ont été comprimés et érodés (l'ancienne limite est en pointillés). Un massif de granite (le massif de l'Aigoual), daté de 220 millions d'années (en rouge), coupe la schistosité : il a lui aussi été érodé (en pointillés). Les calcaires du Secondaire (en bleu) reposent en discordance sur les schistes des Cévennes.