

L'imagerie médicale

Ce dossier a été réalisé en collaboration avec :

- **Pr Guy Frija**, Secrétaire Général de la Société Française de Radiologie,
- **Pr Bernard Mazoyer**, Directeur, Groupe d'Imagerie Neurofonctionnelle, UMR6095, CNRS, CEA, Universités de Caen et Paris 5.

Texte rédigé par Clara Delpas pour le site web de la Fondation pour la Recherche Médicale www.frm.org
Juin 2002

L'imagerie médicale regroupe l'ensemble des techniques utilisées par la médecine pour le diagnostic mais aussi le traitement d'un grand nombre de pathologies. Elle a révolutionné la médecine en donnant un accès immédiat et fiable à des informations jusqu'alors « invisibles » au diagnostic clinique, comme par exemple aux caractéristiques anatomiques, voire même à certains aspects du métabolisme (imagerie fonctionnelle) des organes.

Les techniques d'imagerie médicale ne donnent pas une simple « photographie » du tissu ou de l'organe étudié mais une représentation visuelle fondée sur des caractéristiques physiques ou chimiques particulières. Avec un appareillage certes beaucoup plus lourd que les instruments d'optique (endoscopes, fibres optiques...) - aujourd'hui si petits qu'ils peuvent être introduits dans les étroits canaux du corps humain -, mais sans les contraintes que ces derniers imposent (hospitalisation, anesthésie...). Les appareillages utilisés sont aussi variés que les techniques elles-mêmes ; des techniques qui peuvent être complémentaires les unes des autres.

Quelle est l'histoire de l'imagerie médicale ?

Quels sont les principes physiques des examens d'imagerie médicale ?

Quelles sont les spécificités des différents examens d'imagerie médicale ?

Quelles sont les recherches en cours dans le domaine de l'imagerie médicale ?

L'imagerie médicale, en conclusion.

Quelle est l'histoire de l'imagerie médicale ?

La première technique d'imagerie médicale, la radiographie est née à la fin du 19^{ème} siècle grâce aux travaux de Wilhelm Conrad Röntgen (1845-1923), un physicien allemand. Dans l'obscurité de son laboratoire, ce dernier étudiait l'électricité dans un tube cathodique (un tube de verre muni d'électrodes et dans lequel on fait le vide) quand il vit par hasard, en interposant sa main devant le tube, ses propres os. En plaçant derrière, un papier recouvert d'une substance photographique, il pouvait même en obtenir un cliché. Les rayons X – qualificatif emprunté à celui de l'inconnue algébrique en mathématiques- venaient d'être découverts, permettant de voir à l'intérieur du corps humain sans avoir besoin de l'ouvrir.

Depuis, de nombreuses améliorations ont été apportées à ce principe révolutionnaire, jusqu'à la « radiographie » aux rayons X telle que nous la connaissons aujourd'hui. L'apport de l'informatique et du traitement numérisé des images a abouti à la mise au point du scanner en 1972 par les radiologues britanniques Allan Mc Cornack (1924-1998) et Godfrey N. Hounsfield (né en 1918), prix Nobel 1979 pour cette découverte.

À côté des rayons X, d'autres principes physiques ont été découverts tout au long du XX^{ème} siècle, inspirant, souvent de nombreuses années après, de nouvelles techniques imagerie médicale. Ainsi, la propagation des ultrasons était utilisée par les SONAR (*SOund NAVigation Ranging*) dès 1915 (pour détecter les icebergs suite au naufrage du Titanic) ; c'est un demi-siècle plus tard (en 1955) qu'Inge Edler (1911-2001), un cardiologue suédois, a eu l'idée de mettre au point sur ce principe l'échographie pour diagnostiquer les sténoses mitrales. La résonance des noyaux des atomes (résonance nucléaire) soumis à un champ magnétique a été découverte en 1945 par les physiciens américains Edward Purcell et Felix Bloch ; c'est en 1973 que le chimiste américain Paul C. Lauterbur obtient, chez un animal, le premier cliché en imagerie par résonance magnétique. De la résonance des noyaux des atomes a également découlé la spectroscopie par résonance magnétique, disponible depuis les années 1980. Enfin, la découverte de la radioactivité naturelle par Henri Becquerel, Pierre et Marie Curie en 1898, puis de la radioactivité artificielle par Irène et Frédéric Joliot-Curie en 1934, ont conduit au développement de la médecine nucléaire, avec la scintigraphie dans les années puis la tomographie par émission de positons (TEP).

Quels sont les principes physiques des différents procédés utilisés en imagerie médicale ?

Les rayons X

Les rayons X (RX) sont des ondes électromagnétiques (de même nature que les ondes de lumière mais plus énergétiques). Ils ont la propriété d'être atténués par toutes sortes de substances, y compris les liquides et les gaz. Ils peuvent traverser le corps humain, où ils seront plus ou moins atténués suivant la densité électronique des structures traversées.

Les rayons résiduels (ceux qui auront traversé le corps) provoquent le noircissement du film placé derrière la table de radiographie (technique radiographique traditionnelle). Ainsi, une structure « aérée » comme celle des poumons paraîtra noire. À l'inverse, une structure dense comme les os paraîtra blanche (les rayons X auront tous été absorbés). Il est possible d'opacifier des structures creuses que l'on veut radiographier (appareil digestif, articulation, etc.) en injectant un produit de contraste, opaque aux rayons X, tel que l'iode ou le baryum.

Aujourd'hui, les films radiographiques peuvent être remplacés par des détecteurs électroniques, dont les différents points, stimulés ou non par les rayons résiduels, permettent une numérisation et donc un traitement informatique des images obtenues en radiographie.

Le scanner X permet une modulation si fine de l'irradiation aux rayons X que la zone étudiée peut être comme « découpée en tranches » (d'où l'autre nom du scanner : « tomographie », *tomein* signifiant « couper » en grec). Couplée à un traitement numérique des données, la mesure du coefficient d'atténuation des rayons X permet alors de restituer une image précise de la zone étudiée.

Les ultrasons

Les ultrasons sont des ondes sonores imperceptibles à l'oreille humaine. Comme toutes les ondes sonores, les ultrasons sont absorbés ou réfléchis par les substances qu'ils rencontrent. Les liquides par exemple les absorbent tous. Ils peuvent être émis par une sonde en direction d'un objet solide à atteindre. Le temps qu'ils mettent à revenir à la sonde qui les a émis (écho) est fonction de la distance à laquelle se trouve l'objet. Dans l'échographie, la mesure de l'écho est analysée par un ordinateur et restituée en temps réel sur l'écran sous forme de points plus ou moins noirs délimitant les différentes structures. En pratique, la sonde est dirigée et "promenée" sur la région à examiner après avoir appliqué un gel ou une pâte afin de permettre la transmission des ultrasons (faute de quoi ils seraient arrêtés par l'air).

La résonance magnétique nucléaire

Selon le champ magnétique auquel ils sont soumis, les noyaux de certains des atomes qui composent la matière peuvent entrer « en résonance » : c'est le principe physique de la résonance magnétique nucléaire (RMN). Pour permettre l'enregistrement de ce phénomène, on envoie une onde de radio fréquence courte qui va modifier transitoirement l'orientation des protons qui tournent autour de ces noyaux activés. Lorsque les protons reviennent à leur état initial, ils restituent de l'énergie enregistrable sous forme d'un signal, capté par une antenne réceptrice, puis analysé par de puissants calculateurs. Un traitement informatique permet de construire une image tridimensionnelle, présentée en coupes successives, dont les informations seront variables en fonction de la technique utilisée. En observant, sous l'effet d'un champ magnétique intense, la résonance des noyaux d'hydrogène, élément présent en abondance dans l'eau et les graisses (80% du corps humain), on peut visualiser la structure anatomique de nombreux tissus (IRM anatomique). On peut suivre également certains aspects du métabolisme ou du fonctionnement des tissus (IRM fonctionnelle). La résonance des noyaux d'hydrogène induite par la présence d'hémoglobine permet par exemple de suivre le trajet du sang dans le cerveau.

Il est enfin possible d'accéder à des informations sur des molécules encore plus complexes et d'étudier le déroulement des réactions biochimiques dans un tissu donné : c'est la spectroscopie par résonance magnétique (SRM).

Les isotopes radioactifs

En introduisant des molécules radioactives dans le corps humain, il est possible de suivre leur trajet au moyen d'une caméra qui détecte leur rayonnement lumineux. Les éléments radioactifs utilisés en médecine sont en général artificiels. Les éléments qui émettent de simples photons (thallium, technétium, indium, iode) sont détectables par des gamma-caméras (à l'origine de la gammagraphie ou scintigraphie ou encore tomographie par émission de simples photons (TEMP ou SPECT). D'autres éléments, produits dans un cyclotron (un accélérateur électromagnétique de haute fréquence) sont émetteurs de positons. Les positons sont des particules de matière chargées positivement, qui réagissent avec les électrons du tissu biologique en émettant une énergie lumineuse détectable par une caméra à positons. (tomographie par émission de positons -TEP).

Quelles sont les spécificités des différents examens d'imagerie médicale ?

La radiologie

La radiographie standard permet principalement d'obtenir des clichés en deux dimensions des *structures osseuses* et articulaires : elle est notamment utilisée en orthopédie, en rhumatologie et en orthodontie où elle permet d'étudier les traumatismes osseux (fractures, etc.), les déformations du squelette ou les implantations dentaires. La pneumologie y a aussi recours (radio des *poumons*). Chez la femme, la radiographie du *sein* (mammographie) est devenue un examen systématique de prévention du cancer du sein.

Il est aussi possible de visualiser certains organes ou parties creuses, habituellement invisibles aux rayons X, en les « remplissant » d'un produit de contraste, opaque aux rayons X : c'est la radiographie de contraste.

> Informations pratiques

L'examen radiographique est pratiqué dans les nombreux centres de radiologie répartis sur l'ensemble du territoire français.

Il coûte de 25 à 300 € (160 à 2 000 FRF), remboursés à 70% par la Sécurité sociale.

Il n'y a pas à demander d'entente préalable.

Le scanner (tomodensitométrie)

Le scanner explore un volume du corps : c'est en quelque sorte une « endoscopie virtuelle » qui permet d'établir des images tridimensionnelles des organes ou des tissus (os, muscles ou vaisseaux) constitutifs des zones scannées. À son apparition, il a révolutionné la neurologie en offrant la possibilité de « voir » le cerveau. Dans cette dernière indication, il tend de plus en plus à être remplacé, lorsque cela est possible, par l'IRM. Car si le scanner permet de visualiser une modification de volume ou une anomalie de structure (tumeur, embolie, anévrisme...), il ne permet pas d'en préciser la nature (inflammation, cancer, etc.). En cancérologie, il permet de contrôler la réponse à la chimiothérapie. Il peut aussi être utilisé en chirurgie pour renseigner plus précisément sur les zones où l'intervention est envisagée ou bien encore pour guider les drainages et les biopsies...

Pour l'étude de certains organes, il peut être nécessaire d'injecter (par voie intra-veineuse) ou d'ingérer un "produit de contraste" à base d'iode, opaque aux rayons X.

Les images numériques obtenues sont des images « de coupe », voire même des images en 3D. Avantage de la numérisation des images, les résultats peuvent être mis sur CD-ROM, ce qui en facilite le stockage.

> Informations pratiques

300 centres, hôpitaux et cliniques, sont habilités à pratiquer des scanners en France. L'examen coûte environ 153 € (1000 FRF). Il est remboursé à 70% par la Sécurité sociale.

L'échographie

L'échographie permet d'explorer le cœur, les organes digestifs (foie, rate, pancréas, vésicule biliaire), urinaires (vessie, reins) et génitaux (prostate et testicules, ovaires et utérus). Le tube digestif et les poumons, de même que les os et les gaz, ne lui sont en revanche pas accessibles.

L'échographie doppler, qui utilise une sonde plus fine, permet d'explorer le système vasculaire et a des indications majeures pour les maladies des veines et des artères.

Les échographies de la grossesse permettent d'apprécier la vitalité et la morphologie du fœtus ainsi que son environnement (liquide amniotique, placenta, cordon, ...).

En noir et blanc à ses débuts, l'échographie permet aujourd'hui d'obtenir des clichés en couleur. Avec l'apport de la vidéo, elle peut même enregistrer des séquences animées.

> Informations pratiques

Cet examen est pratiqué dans de très nombreux centres en France, voire directement dans le cabinet du médecin. Hors obstétrique, il coûte de 30 à 137€ (entre 200 et 900 FRF) et est remboursé à 70% par la Sécurité sociale. Pour la femme enceinte, trois échographies obstétricales sont proposées, à 10, 20 et 30 semaines de grossesse. Elles coûtent de 30 à 80€ (de 200 à 500 FRF) et sont entièrement prises en charge par la Sécurité sociale.

L'IRM

L'imagerie par résonance magnétique (IRM) permet de visualiser la structure anatomique de tout volume du corps, en particulier des « tissus mous » tels que le cerveau, la moelle épinière, les viscères, les muscles ou les tendons. (IRM anatomique, qui repose sur l'aimantation des atomes d'hydrogène, présents notamment partout où il y a de l'eau (80 % du poids corporel) ou de la graisse). L'IRM permet aussi de suivre l'activité d'un organe tel le cerveau, à travers l'afflux de sang oxygéné dans certaines de ses zones (IRM fonctionnelle, qui repose sur l'aimantation des noyaux d'hydrogène, induite par la présence d'hémoglobine contenue dans les globules rouges).

Contrairement au scanner X, qu'elle remplace dans de nombreuses indications, l'IRM permet de mieux définir la nature des lésions observées. Elle est utilisée en neurologie (diagnostic de la sclérose en plaques, de la maladie d'Alzheimer, de l'épilepsie, des accidents vasculaires cérébraux ou des lésions de la moelle épinière) ainsi qu'en ophtalmologie, en endocrinologie, en oto-rhino-laryngologie (ORL), en ostéoarticulaire et cardiovasculaire.

> Informations pratiques

Compte-tenu d'un sous-équipement en appareils en France (moins de 200 appareils sur l'ensemble du territoire !), l'IRM est souvent indisponible. Les délais d'attente pour obtenir l'examen sont fréquemment de l'ordre de 30 jours. Dans le contexte de l'urgence, il est là encore possible de remplacer l'IRM par un scanner aux rayons X, aux moindres performances.

L'IRM coûte de 380 à 500€ (de 2500 à 3000FRF). Il est remboursé à 70% par la Sécurité sociale dans tous les cas. Il n'y a pas à demander d'entente préalable.

La spectroscopie par résonance magnétique (SRM)

La spectroscopie par résonance magnétique permet d'obtenir des informations sur le métabolisme des cellules qui composent les tissus, grâce au dosage des molécules biologiques, dont la concentration est de quelques grammes par litre dans le tissu étudié au cours de son fonctionnement. Ses applications principales concernent l'étude du métabolisme musculaire et l'étude du métabolisme cérébral. Par exemple, la SRM du noyau phosphore permet l'étude biochimique du muscle pendant et après un effort intense grâce au dosage des métabolites musculaires contenant du phosphore (phosphocréatine, ion phosphate, ATP, ADP...). La SRM peut aussi détecter des processus inflammatoires, infectieux, tumoraux ou dégénératifs, mais les anomalies observées ne sont pas spécifiques de tel ou tel processus. Aussi l'apport de la SRM par rapport à l'IRM classique fait-il encore l'objet d'études.

La scintigraphie

La scintigraphie utilise une petite quantité de radioactivité pour réaliser des images (d'où le nom de médecine nucléaire). Elle permet de visualiser le fonctionnement d'un organe (cœur, poumons, reins, vessie, organes digestifs) ou de tout un système (système ostéo-articulaire, système endocrinien, système immunitaire...). Elle permet en procédant au « marquage » de certaines molécules de l'organisme, d'en étudier la circulation dans le corps (scintigraphie des globules blancs par exemple). Ces cellules « marquées » peuvent être visualisées sur la caméra car elles irradient de la lumière.

> Informations pratiques

Cet examen est pratiqué dans les services de médecine nucléaire (compte-tenu de la radioactivité des isotopes). Il coûte de 120 à 420 € (de 800 à 3 000 FRF), et remboursé à 70% par la sécurité sociale.

La tomographie par émission de positons (TEP)

La tomographie par émission de positons (TEP ou PET = "*Positron emission tomography*", en anglais) ne donne pas d'image anatomique mais renseigne sur la biochimie des organes. Elle fournit des informations sur le fonctionnement des tissus normaux et pathologiques. Suivant l'isotope radioactif utilisé, elle donne au médecin des informations spécifiques sur le métabolisme des tissus. Elle permet d'étudier *in vivo* le fonctionnement biochimique d'un organe, tel que le cerveau, le cœur ou les poumons, en donnant des informations spécifiques sur le métabolisme de ses tissus : flux et volume sanguin, consommation cellulaire du glucose... Les cellules cancéreuses par exemple consomment plus de glucose que les cellules bénignes, ce qui permet de repérer par cette technique d'éventuels « points chauds » témoins de récurrences cancéreuses. Si elle est particulièrement intéressante en cancérologie, la TEP a des applications dans d'autres disciplines : en neurologie, elle permet par exemple de visualiser les pertes neuronales du système dopaminergique qui signent la maladie de Parkinson, ou bien encore les zones hyperactives du cerveau dans l'épilepsie. Elle offre en outre la possibilité de tester *in vivo* l'efficacité des médicaments, ce qui intéresse notamment la cardiologie dans la mise au point de nouveaux traitements.

En France, l'usage de la TEP est encore peu répandu : seuls 5 appareils à visée médicale sont installés, ceci s'expliquant en partie par le faible nombre de cyclotrons implantés. Or la proximité d'un cyclotron est absolument indispensable car les produits utilisés pour la TEP n'ont une durée de vie que de quelques heures.

Quelles sont les recherches en cours dans le domaine de l'imagerie médicale ?

Une recherche fondamentale très active

Le couplage des différentes techniques a permis de développer l'imagerie multimodale, qui se décline en multiples aspects. La fusion de techniques montrant l'anatomie, la fonction et l'activité d'une structure donne accès à des informations de plus en plus pointues. Par exemple, l'utilisation conjointe de la magnétoencéphalographie (MEG, une technique dérivée de l'électroencéphalographie, qui permet de mesurer le champ magnétique dû à l'activation des neurones au moyen de capteurs très sensibles) et de l'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf), permet de cerner les processus neuronaux les plus complexes, comme par exemple la reconnaissance des objets et des personnes.

Des recherches s'attachent à combiner la résonance magnétique nucléaire et la résonance magnétique électronique pour étudier les radicaux libres, stigmates du vieillissement tissulaire.

De nouvelles perspectives pour l'échographie

Si le progrès des calculateurs a rendu possible l'obtention d'images 3D spectaculaires, principalement en obstétrique, les principales améliorations de l'échographie sont d'ordre technologique, portant sur les réseaux de transducteurs piézoélectriques ou sur l'intégration de l'électronique numérique.

De nouveaux procédés de focalisation électronique des ondes ultrasonores permettent d'obtenir des images ultrasonores en temps réel, avec une résolution de quelques dizaines de microns seulement : cette biomicroscopie acoustique permet désormais l'examen de l'œil et de la peau.

Des techniques assez récentes, comme l'ostéodensitométrie ultrasonore ou l'élastographie, prennent un essor important et pourraient s'imposer comme de nouvelles modalités diagnostiques s'appuyant sur la nature élastique des ondes sonores pour évaluer la résistance des tissus solides (os) ou l'élasticité des tissus mous (sein, prostate : détection des tumeurs).

L'élastographie transitoire (toujours dérivée de l'ultrasonographie) a pour but de cartographier dans une partie du corps le "module de cisaillement", une des grandeurs caractérisant l'élasticité et qui peut varier d'un facteur 30 entre un tissu sain et un tissu cancéreux. Un prototype devrait prochainement être testé à l'Institut Curie pour la détection de cancers du sein.

La découverte récente des miroirs à "retournement temporel" des ondes acoustiques laisse entrevoir de nouvelles applications médicales. Le développement d'un "filtre inverse spatio-temporel", ouvre notamment la voie à la mise au point d'un imageur à ultrasons du cerveau .

L'imagerie fonctionnelle du cerveau devrait pouvoir prochainement bénéficier d'une cartographie en temps réel des flux sanguins par des techniques dérivées de l'effet Doppler.

Les recherches en IRM

Des progrès ont été faits récemment dans l'imagerie fonctionnelle du cerveau, l'imagerie mammaire, les applications pour la radiologie interventionnelle ainsi que la possibilité d'avoir des images en temps réel.

En couplant à la RMN un système de « pompage optique » (un laser "bousculant" l'aimantation des noyaux d'hélium que le patient aura au préalable inhalé), il est désormais possible de réaliser une IRM fonctionnelle des poumons, alors que ceux-ci sont habituellement invisibles à l'IRM (l'air seul étant de trop faible densité pour impressionner l'IRM).

Des antennes en matériaux supraconducteurs permettent aujourd'hui de réaliser des images microscopiques par résonance magnétique de tissus superficiels tels que la peau.

L'imagerie médicale, en conclusion

Devenue indispensable au diagnostic d'un grand nombre de pathologies (y compris de nombreuses maladies du système nerveux comme la sclérose en plaques ou la maladie d'Alzheimer), l'imagerie médicale est utilisée dans un but préventif, pour le dépistage d'un certain nombre de cancers. Elle permet aussi un suivi très précis de l'évolution d'une maladie en offrant des comparatifs rationnels. Elle est aussi utilisée pour aider ou assister une intervention éventuelle (imagerie interventionnelle), qu'il s'agisse d'un examen complémentaire requis pour le diagnostic, tel une biopsie (ponction), ou d'une intervention nécessaire au traitement, tel que des infiltrations ou un drainage. L'imagerie médicale a par ailleurs une utilité particulière en pharmacologie où elle permet de tester *in vivo* l'efficacité d'un traitement pharmaceutique, et donc de limiter notablement le nombre d'animaux utilisés dans le cadre d'expérimentations. Enfin, l'imagerie a également contribué à faire exploser la connaissance des différentes fonctions sensori-motrices et cognitives chez l'homme (langage, raisonnement, mémoire, apprentissage, motivation, émotion).

Ces multiples applications rendent la recherche fondamentale dans ce domaine particulièrement active. Les développements et les applications à la pratique courante restent néanmoins limités tant par les coûts élevés des différents appareillages que par des contraintes techniques importantes. C'est une généralité qui vaut en particulier pour la France, particulièrement à la traîne en ce qui concerne l'équipement en IRM et en TEP, comme l'atteste les publications de la Société Française de Radiologie (SFR).

Texte rédigé par Clara Delpas
Avril 2002

Pour en savoir plus :

« Fiches patients »
de la Société française de radiologie
20, avenue Rapp
75343 Paris Cedex 07

<http://www.sfr-radiologie.asso.fr>
ou <http://www.sfrnet.org>