

SOMMAIRE

Snitem

Syndicat national de l'industrie
des technologies médicales

Maison de la Mécanique
39, rue Louis Blanc
CS 30080
92038 La Défense Cedex



Directeur de la publication : Éric Le Roy

Responsable d'édition : Nathalie Jarry

Rédactrice : Nathalie Ratel

Édition déléguée : Presse Infos Plus

(www.presse-infosplus.fr)

Secrétariat de rédaction et édition : Studio h'artpon

Création graphique : ArtFeelsGood

Maquette : Didier Michon

Crédits photos, tous droits réservés : Canon Medical
Systems France, DMS, Eos imaging, Fujifilm France,
GE Healthcare, Hitachi Medical Systems, Mindray
Medical France, Philips France, Primax, Siemens
Healthcare, Stephanix, Supersonic Imagine.

Impression : Imprimerie de l'Étoile 61190 Tourouvre

Nouvelle édition - Septembre 2019

ISBN : 979-10-93681-23-8

Les mots techniques ou scientifiques expliqués
en fin de livret dans la partie glossaire sont signalés
dans le texte par le symbole 

3

4

6

10

16

22

26

32

38

45

46

49

PRÉFACE

INFOGRAPHIE

INTRODUCTION

L'imagerie médicale, une fenêtre ouverte
sur le corps

Radiologie

La seconde vie d'une centenaire

Scanner

L'intérieur du corps en 3D

Tomographie par émission
de positons (TEP)

Une arme anticancer... mais pas seulement

Échographie

Les ultrasons au service du diagnostic et du soin

Thérapie guidée par l'image

Quand l'image guide le geste

Imagerie par résonance
magnétique (IRM)

Voir l'eau est sa force

LE REGARD DU PATIENT

« Une prise en charge plus rapide et plus fluide »

GLOSSAIRE

SOURCES & REMERCIEMENTS

Innovation en imagerie

« Les perspectives sont encore grandes »

PRÉFACE



Professeur Jean-François Meder

Président de la Société française de radiologie (SFR)

Prévention, dépistage, diagnostic, thérapeutique et suivi : l'imagerie médicale est aujourd'hui incontournable dans le parcours de santé et de soins du patient et intervient à toutes les étapes. Cela n'aurait pu être possible sans les innovations techniques et technologiques que la discipline a connues de façon continue pendant plusieurs décennies, et qui nous ont permis d'en connaître toujours davantage sur le corps humain et ses pathologies.

Loin de s'arrêter, ce mouvement perdure et s'intensifie avec, en point de mire, un bénéfice toujours plus grand pour les patients. Ainsi, les innovations apportées aux dispositifs médicaux en imagerie permettent aujourd'hui des examens toujours plus précis, plus rapides, moins invasifs et moins anxiogènes. Des examens qui gagnent donc en qualité et en pertinence, ce qui profite tant au radiologue qu'au patient.

L'essor de l'imagerie interventionnelle est un aspect significatif de cette marche en avant de l'innovation. Aujourd'hui, en effet, le radiologue n'intervient plus seulement au stade du diagnostic, mais également dans le champ thérapeutique. Dans des salles dotées de plusieurs modalités d'imagerie, il œuvre, parfois de concert avec d'autres professionnels de santé, pour emboliser un vaisseau, positionner un stent ou encore détruire un nodule, par exemple.

La téléradiologie est également un domaine prometteur de l'innovation en imagerie et de consolidation du maillage territorial – l'un des grands défis de notre système de santé.

Le champ des possibles vient encore de s'élargir avec, notamment, l'avènement de l'intelligence artificielle. Celle-ci, qu'elle soit embarquée dans les machines, dans des logiciels ou dans des plateformes, permet déjà de récolter et de croiser de nombreuses données, non seulement d'imagerie, mais également, dans un futur proche, cliniques, anatomopathologiques, biologiques, génomiques, etc. Nous sommes à l'aube d'une véritable révolution médicale qui suscite beaucoup d'attentes.

Et ce n'est pas tout ! Certains dispositifs intelligents, comme des logiciels, effectuent de manière autonome le repérage et l'identification de certaines anomalies voire la reconstruction d'images. Cela facilite le diagnostic, augmente l'expertise et redonne du temps médical au radiologue qui peut le consacrer à l'accompagnement du patient. Là encore, ce sont autant d'avancées bénéfiques pour tous.

À l'heure de la médecine de précision, individualisée et prédictive, l'imagerie joue plus que jamais un rôle central et crucial dans le paysage médical.

L'IMAGERIE AU SERVICE DU PATIENT

L'imagerie intervient à chaque étape du parcours de soins du patient, auquel elle apporte de grands bénéfices : ces dispositifs médicaux innovants permettent d'améliorer la qualité de sa prise en charge, de son suivi et de son accompagnement.



1 PRÉVENTION

- Réduire voire éviter l'incidence et la gravité des pathologies.
- Fournir des données permettant l'élaboration de programmes préventifs.



2 DÉPISTAGE

- Détecter les anomalies et les malformations, les cancers (du sein, de la prostate, etc.)
- Permettre une prise en charge précoce.



3 DIAGNOSTIC

- Augmenter la précision du diagnostic.
- Évaluer la sévérité d'une pathologie.
- En trouver la cause ou l'origine en venant en renfort de la biologie et de la clinique.



5 SUIVI

- Permettre le suivi et la surveillance de certaines pathologies, notamment chroniques.
- Prévenir les récurrences.



4 TRAITEMENT

- Participer à l'arrêt et/ou à la modification d'un traitement (avec l'implication des radiologues aux réunions de concertation pluridisciplinaires).
- Guider certaines interventions et réduire leur invasivité.

L'IMAGERIE AU CŒUR DE LA MÉDECINE

Les progrès réalisés dans de nombreuses spécialités médicales ne sauraient être possibles sans l'apport de l'imagerie. Quelques exemples – non exhaustifs.



Gynécologie

ex : suivi prénatal



Cancérologie

ex : suivi des tumeurs



Cardiologie

ex : guide de sondes d'électrophysiologie



Chirurgie

ex : endoscopie



Urgence

ex : AVC



Psychiatrie

ex : schizophrénie



Orthopédie

ex : traumatologie, ostéoporose



Bucco-dentaire

ex : implantologie



Neurologie

ex : maladies d'Alzheimer et apparentées

INTRODUCTION

L'IMAGERIE MÉDICALE, UNE FENÊTRE OUVERTE SUR LE CORPS

Née avec la découverte des rayons X et de la radiographie, l'imagerie médicale s'est considérablement diversifiée tout au long du XX^e siècle. Elle est aujourd'hui un outil incontournable dans la prise en charge des patients. Utilisée tout au long du parcours de soins, elle évolue en permanence et s'appuie sur des technologies à la pointe de l'innovation.



Toute aventure humaine compte ses pionniers sans lesquels rien n'aurait été possible. L'histoire de l'imagerie médicale débute à la fin du XIX^e siècle lorsqu'un certain Wilhelm Röntgen, physicien allemand, découvre une nouvelle sorte de rayons invisibles, qu'il baptise rayons X, et grâce auxquels on peut photographier à travers un corps opaque. L'engouement pour cette technique est immédiat.

« Pour le grand public, ces rayons invisibles sont un divertissement présenté dans des grands magasins, des cafés, des fêtes foraines et même des soirées mondaines. Des séances de radioscopie

alternent fréquemment avec celles de cinématographie, toutes deux étant considérées comme de simples distractions par les contemporains en admiration devant les progrès de la science et de la technologie », racontent Guy et Marie-Josée Pallardy en 2006 lors d'une communication d'histoire de la médecine intitulée *Histoire abrégée du radiodiagnostic et de l'imagerie médicale*. Le corps médical est lui aussi sous le charme et la radiologie fait son entrée dans les hôpitaux dès l'année 1897. Il faut alors près de trente minutes pour obtenir une image thoracique.

L'âge d'or de l'imagerie

À mesure que la demande s'accroît, médecins, ingénieurs, pharmaciens et industriels collaborent. Le film souple apparaît en 1914 pour remplacer les plaques de verre à simple émulsion. Les appareils d'alors sont suffisamment performants pour être utilisés au chevet des blessés sur le front pendant la Première Guerre mondiale. À l'issue du conflit, l'intérêt de la radiologie fait l'unanimité. « *La période 1920-1960, qualifiée d'âge d'or de la radiologie aux États-Unis, correspond à l'épanouissement de cette spécialité médicale* », notent M. et Mme Pallardy.

Les innovations se succèdent. Elles concernent tout autant les tubes d'émission des rayons X que les écrans radiographiques et les produits de contraste permettant de visualiser les organes creux et les vaisseaux. Avec l'arrivée des amplificateurs de luminance en 1953, les salles de radiologie sortent de l'ombre car les médecins ne sont plus obligés de travailler dans le noir. À la même époque est mise au point la caméra

à scintillation qui permet les premiers examens de scintigraphie en médecine nucléaire, bien avant la mise au point de la tomographie par émission de positons. Les années 60 sont celles de la naissance de modalités d'imagerie fondées sur d'autres moyens que les rayonnements, à commencer par l'échographie et l'échodoppler, tous deux inspirés de la technique du sonar, qui utilise les ultrasons pour repérer un objet à distance. Ainsi devient-il possible dans certains cas de s'affranchir des rayons X qui, à hautes doses, produisent sur l'organisme des effets délétères. Puis vient le tour de l'imagerie par résonance magnétique (IRM) issue du travail de physiciens sur le phénomène de la résonance magnétique et qui fait ses débuts dans la sphère médicale au milieu des années 70. Celle-ci produit d'abord des images en coupe de la tête, sur lesquelles on distingue bien les différents tissus mous, puis, dès le début des années 80, des vues en trois dimensions du corps entier. La décennie 70 est aussi celle du développement des premières générations de scanners à

rayons X qui permettent eux aussi de visualiser les différents organes dans l'espace, et en particulier les structures osseuses et les poumons.

Imagerie anatomique, fonctionnelle puis interventionnelle

À la fin des années 70, les progrès de l'informatique et de l'électronique ouvrent une nouvelle page de l'histoire de l'imagerie médicale. Ils ont tôt fait d'en envahir les différentes modalités et en améliorent considérablement les performances. En l'espace d'une dizaine d'années émergent, entre autres, les scanners spiralés puis multi-barrettes, l'IRM fonctionnelle, la radiographie numérisée ou encore l'imagerie dite fonctionnelle. En effet, l'imagerie anatomique, qui livre des vues de l'intérieur du corps, compose désormais avec des modalités d'imagerie fonctionnelle qui révèlent l'activité et le métabolisme des tissus. Les possibilités offertes par l'imagerie médicale s'étendent, conséquence directe de l'évolution >>>

De la 2D à la 4D

L'imagerie médicale est née en deux dimensions (2D), avec la radiographie sur film. La 3D est arrivée avec l'essor du numérique et de la radiographie par coupes successives (scanner) permettant de reconstituer un volume. Enfin, depuis une dizaine d'années, la 4D ouvre la voie à l'imagerie dynamique. Celle-ci permet, en temps réel, de suivre l'évolution de fluides au sein du corps pour localiser une obstruction, d'observer le comportement d'une articulation pour constater un traumatisme, voire de repérer les vaisseaux alimentant les tumeurs cancéreuses pour mieux les fermer. La 4D se retrouve sur les scanners, angiographes et IRM les plus récents.

1895

Découverte
des rayons X

1897

Première
radiographie
effectuée en France

1951

Premier
échographe destiné
à la recherche de
tumeurs cérébrales

1964

Début de la
radiologie
interventionnelle

1971

Premier scanner
clinique réalisé
à Londres sur un
patient présentant
un kyste cérébral

1975

Premières
images IRM
de tissus
humains



»»» technique des systèmes qui ont gagné à la fois en puissance, en précision et en sensibilité. L'imagerie interventionnelle, qui consiste à guider un acte diagnostique ou thérapeutique par l'image, bénéficie largement de ces avancées. En imagerie, la radiologie a été mise à contribution à cette fin en premier, d'abord pour effectuer des angioplasties puis pour prendre en charge les anévrismes cérébraux ou pour procéder à des traitements cancérologiques. Désormais, on a recours au scanner, à l'échographie et à l'imagerie par résonance magnétique (IRM) pour guider les interventions.

La période récente est également marquée par l'arrivée de la tomographie par émission de positons (TEP), utilisée à des fins cliniques depuis le milieu des années 2000 après avoir été pendant longtemps un puissant outil de recherche en neurosciences. Couplée au scanner (TEP Scan), elle a considérablement amélioré la prise en charge des cancers. Associée à un appareil IRM, elle offre de nombreuses perspectives cliniques, notamment en neuroradiologie. Elle pourrait révolutionner la

compréhension de certaines pathologies comme les maladies neurodégénératives, psychiatriques, cardio-vasculaires et les cancers.

Les développements continuent

L'imagerie médicale actuelle est un éventail d'outils en mesure d'aider au diagnostic, d'évaluer la sévérité d'une maladie, de guider une intervention, de contribuer à la prise en charge et au suivi thérapeutique, voire d'améliorer les connaissances sur l'anatomie ou le fonctionnement du corps humain. « Dans 30 à 40 % des cas, le support de l'imagerie a permis de modifier l'attitude thérapeutique au bénéfice du patient », relève l'Institut national de la santé et de la recherche médicale (Inserm). Modalités anatomiques ou fonctionnelles, utilisant les rayonnements ionisants, le champ magnétique ou les ultrasons : chaque technologie a ses atouts mais aussi ses limites qui conditionnent ses indications tout autant que les développements

1992

Premières images
du cerveau en
fonctionnement

2002

Premières utilisations
du scanner pour
établir un diagnostic
coronaire

Milieu des années

2000

Large diffusion
de la TEP
en clinique

2008

Première utilisation
de l'IRM interventionnelle
pour traiter une tumeur
cérébrale

2017-18

Essor de la réalité
augmentée
et de l'IA

dont elle fait l'objet. Pour la radiographie et le scanner, par exemple, la réduction des doses est devenue un enjeu central dès lors que les effets néfastes des rayons X sur l'organisme ont été mis en évidence.

À mesure que les technologies se développent, de nouveaux usages voient le jour. Les exemples ne manquent pas : ainsi, en médecine nucléaire, la production de nouveaux traceurs élargit les indications de la TEP, laquelle devient un outil diagnostique également en cardiologie et en neurologie. Quant aux IRM à haut champ, ils fournissent des séquences fonctionnelles en un temps record, et ceux à large tunnel, voire complètement ouverts, permettent de proposer l'examen à de nouveaux patients, notamment aux enfants, aux personnes obèses et aux personnes handicapées. L'imagerie spectrale, qui s'appuie sur des scanners à plusieurs niveaux d'énergie, donne pour sa part accès à l'étude de la ventilation et la perfusion du poumon. De son côté, la stéréoradiographie « corps entier », acquisition simultanée d'images rayons X de

face et de profil, permet une modélisation 3D du squelette en position debout et facilite grandement la planification chirurgicale et le suivi des pathologies ostéo-articulaires. Sans compter l'élastographie qui revisite la prise en charge des maladies du foie.

Et ce n'est pas fini ! De nombreux établissements de soins équipent des salles opératoires d'appareils d'imagerie de pointe, combinant souvent plusieurs modalités à l'instar des couplages TEP-IRM et angiographe-scanner. Associés à des logiciels capables de fusionner des images pré et per-opératoires en 2D, 3D et 4D, ils fournissent aux chirurgiens et aux radiologues interventionnels des informations en temps réel sur les zones où ils doivent intervenir.

La voie de la réalité augmentée et de l'intelligence artificielle

Depuis 2017, l'imagerie médicale bénéficie également des avancées de la réalité augmentée.

Celle-ci permet de superposer, au bloc opératoire, sur un écran ou des lunettes, un grand nombre d'images médicales. Cette technique, associée à l'utilisation de logiciels reposant sur l'intelligence artificielle (IA), permet au chirurgien de préparer son geste opératoire et de connaître l'emplacement précis des lésions par rapport aux tissus sains. Encore peu répandue, elle constitue une voie d'avenir pour les chirurgiens de nombreuses spécialités médicales.

D'autres modalités d'intelligence artificielle, développées depuis quelques années, sont proposées pour analyser des images et faciliter la détection et la caractérisation de certaines anomalies (comme les nodules, les tumeurs...), mais aussi pour évaluer le risque d'apparition de certaines pathologies. Les capacités de calcul, de comparaison entre des millions de clichés, mais aussi de croisement de données multiples (d'imagerie, de biologie, cliniques, etc.) rendent aujourd'hui possibles de tels exploits. Et certaines de ces solutions logicielles montrent des résultats prometteurs.

LA SECONDE VIE D'UNE CENTENAIRE

Pionnière de l'imagerie médicale, la radiologie conventionnelle a longtemps été la seule technique disponible pour visualiser l'intérieur du corps humain. L'arrivée d'autres modalités telles que l'échographie, le scanner et l'IRM aurait pu l'évincer. C'était sans compter le potentiel d'innovation des rayons X...



DE LA THÉORIE...

La radiologie conventionnelle est la première modalité d'imagerie existante. Elle permet l'exploration du corps humain grâce aux rayons X. Elle est particulièrement adaptée à la visualisation des tissus denses. L'orthopédie, la rhumatologie et l'orthodontie y ont fréquemment recours, afin d'étudier l'état du squelette et des articulations ou encore l'implantation des dents. La radiologie conventionnelle permet également d'observer les poumons, l'abdomen et les seins (on parle dans ce dernier cas de mammographie .

« *La radiologie de thorax et la mammographie sont encore largement utilisées dans le monde* », précise le Pr Jean-Pierre Pruvo, chef du pôle Imagerie, médecine nucléaire et explorations fonctionnelles au

centre hospitalier régional universitaire (CHRU) de Lille. Ces techniques permettent notamment de détecter des tumeurs ou des signes d'infections ou d'affections pulmonaires (tuberculose, bronchite chronique, etc.).

À LA PRATIQUE

Générés par un tube, les rayons X traversent le corps humain mais sont plus ou moins absorbés par les tissus en fonction de leur densité. De l'autre côté du patient, un film photographique imprime le résultat comme le ferait une pellicule photo. Le cliché obtenu est appelé « radiographie ». Dans les systèmes actuels, le film a été remplacé par un détecteur électronique, plus sensible, qui numérise directement les images.

L'acquisition est rapide. En injectant un produit de contraste, il est possible de rendre plus opaques certaines structures creuses comme l'appareil digestif ou les articulations, qui apparaissent alors plus nettement sur l'image. De plus, l'injection de produit de contraste iodé en intravasculaire permet de radiographier les vaisseaux de tous les organes (« angiographie »).

UNE HISTOIRE D'INNOVATION

La radiologie conventionnelle est de loin la plus ancienne modalité d'imagerie médicale. Elle est aussi celle par qui certaines autres sont arrivées, à commencer par le scanner qui, comme elle, utilise les propriétés des rayons X.

Celles-ci sont mises en évidence à la toute fin du XIX^e siècle (voir encadré sur la « main de Bertha »). Très vite, le corps médical s'intéresse de près à la technique et, dès 1897, le P^r Antoine Béclère réalise à l'hôpital Tenon (Paris) les premières radiographies sur un patient. La radiologie prend son essor durant la Première Guerre mondiale : pour faire face à l'afflux de blessés de guerre, on s'appuie de plus en plus sur l'aide qu'apportent les rayons X et la radiologie dont la maîtrise augmente de jour en jour. On s'en sert notamment pour repérer les corps étrangers et les fractures osseuses avant de pratiquer une chirurgie. Sur le front, les « petites Curies » sont des ambulances radiologiques inventées par Marie Curie pour pratiquer sur place des radios d'urgence. >>>

De la 2D à la 3D, grâce à de nouvelles techniques d'acquisition

De nouvelles techniques d'acquisition d'images apparaissent dans le courant des années 2000.

La **tomosynthèse**, par exemple, est notamment utilisée en **imagerie du sein** : la rotation d'un tube à rayons X au-dessus du sein permet l'acquisition d'une série d'images mammographiques en deux dimensions (2D), sous différents angles. À partir de ces images, le volume du sein (3D) est alors reconstruit grâce à un algorithme mathématique complexe.

Lancée en 2008 après la mise au point de différents prototypes dès le début des années 2000, la mammographie 3D a mis plusieurs années à s'imposer, temps nécessaire pour que des preuves cliniques de son efficacité soient disponibles. Complémentaire de la mammographie (et souvent réalisée juste après), elle favorise le diagnostic précoce du cancer du sein, notamment chez des patientes ayant des seins denses ou des antécédents de cancer du sein (sur ce sujet, lire le livret « Santé de la femme » du Snitem, dans la même collection). Très courante aux États-Unis et dans les pays du Nord, cette technique est utilisée de plus en plus fréquemment en France.

Le recours à la **tomosynthèse** en radiologie conventionnelle en cas de **pathologie ostéo-articulaire ou pulmonaire** existe depuis près de dix ans. Réalisée sur une table de radiologie télécommandée à capteurs numériques, elle permet de reconstruire puis d'explorer le volume d'un poumon ou d'une structure osseuse ou articulaire (le poignet ou le genou par exemple). L'examen par scanner (examen 3D plus approfondi) reste toutefois, en France, le plus utilisé.

L'**acquisition 3D réelle** est basée sur le même principe que la tomosynthèse avec un angle de balayage plus large et un nombre d'acquisitions plus important. Elle est utilisée sur les extrémités ainsi que les patients debout en charge en cas de pathologie ostéo-articulaire.

1895

Découverte
des rayons X

1897

Premières radiographies
effectuées à l'hôpital
Tenon (Paris)

1914

Apparition
des films souples

1931

Première
artériographie
cérébrale

1964

Début de
la radiologie
interventionnelle



»» Plusieurs médecins étant formés au cours de cette période, la technique se répand rapidement après-guerre.

Le film photographique est le premier à être utilisé en radiologie. Comme pour les photographies argentiques, la révélation de l'image puis sa fixation sont nécessaires pour qu'apparaissent en noir les zones les plus exposées et en blanc les moins exposées. La technique perdure pendant des décennies jusqu'à la digitalisation qui débute dans les années 80. L'exploration du cœur introduit les techniques de radio-cinéma pour en visualiser la dynamique. La radiologie informatisée utilise alors un écran radioluminescent à mémoire à la place du film. Sur celui-ci, l'image latente est révélée grâce à un balayage laser puis numérisée.

L'ère numérique

Bientôt, les premiers capteurs plans[®] prennent la relève pour détecter les rayons X et fournir immédiatement une image numérisée. La radiologie numérique est née. Désormais, les radiologues

peuvent ajuster le contraste de l'image, améliorer sa qualité et se passer de consommables et de produits chimiques. « *L'imagerie numérique a ouvert la voie à tous les traitements possibles des constantes. À partir d'une seule acquisition, on obtient plusieurs images qui peuvent être retravaillées, réduites ou agrandies* », explique le Pr Valérie Bousson, radiologue au sein du service de radiologie ostéo-articulaire de l'hôpital Lariboisière (Paris).

La mammographie, qui concerne spécifiquement le sein, a bénéficié des mêmes évolutions. Dès la fin des années 80, la technique numérique améliore considérablement la qualité de cet examen et ouvre la voie à un diagnostic plus précis et plus précoce du cancer du sein (cancer le plus fréquemment observé chez les femmes en Europe et aux États-Unis), mais aussi au dépistage. De fait, peu à peu, les femmes prennent l'habitude de faire des mammographies avant d'être malades (*sur ce sujet, lire le livret « Santé de la femme » du Snitem, dans la même collection*).

À l'heure où la radiologie conventionnelle se modernise, d'autres modalités d'imagerie voient

1965

Premier mammographe

1980

- Début de la numérisation des clichés
- Radiographies basse dose 2D/3D corps entier
- Amélioration continue de la limitation des rayons X

2000

Essor de l'intelligence artificielle

2008

Mise sur le marché du premier appareil de tomosynthèse mammaire numérique

2010

Lancement de logiciels permettant de prédire le risque de certaines pathologies



le jour et démontrent leur pertinence dans de nombreuses indications. L'IRM est utilisée depuis la fin des années 70 pour explorer l'anatomie puis l'activité des tissus, tandis que les scanners spirales permettent d'acquérir rapidement des images en trois dimensions de tout le corps humain (*lire les chapitres suivants*). La radiologie conventionnelle ne règne plus en maître sur l'imagerie médicale. Néanmoins, elle demeure la modalité de référence pour l'étude des os et du squelette. Qui plus est, elle continue de contribuer, aux côtés du scanner, à l'exploration du poumon.

La stéréoradiographie du corps entier

La radiologie étant très prisée par les spécialistes de l'os, reste à savoir comment la réinventer. La grande taille de certains os et les fortes doses de rayons X nécessaires pour obtenir des clichés de qualité constituent des faiblesses. De plus, les orthopédistes veulent disposer d'une vue d'ensemble du squelette en 2D et 3D pour visualiser >>>

0,1

millisievert

Chiffre clé

C'est la dose moyenne d'exposition aux rayons X générée pour une radiographie pulmonaire. À titre de comparaison, la dose annuelle d'exposition naturelle en France est 24 fois plus élevée.

Source : *L'irradiation médicale en 10 épisodes*, Société Française de radioprotection (SFRP).

» son organisation et le positionnement dans l'espace des structures osseuses. Aussi, dès 2003, un nouveau prototype permet une radiographie 2D/3D du corps entier en position fonctionnelle, c'est-à-dire debout ou assis. Celui-ci utilise 50% de rayons X en moins par rapport à une radiographie numérique conventionnelle. Explorant le patient de manière à la fois verticale et linéaire, il



acquiert simultanément une vue de face et de profil – d'où son nom de « stéréoradiographie » – du squelette entier (en moins de 20 secondes pour un adulte et moins de 15 secondes pour un enfant). À noter qu'il recourt à des détecteurs ultra-sensibles issus des travaux qui ont valu le prix Nobel de physique au P^r Georges Charpak en 1992.

Depuis, la technologie se diffuse à travers le monde pour le suivi des déformations de la colonne vertébrale chez les enfants et les adultes et, plus largement, pour l'examen du système ostéo-articulaire et les besoins de la chirurgie orthopédique. « Avant, on devait travailler par segments et exposer le patient aux rayons X pendant une heure pour obtenir toutes les coupes face et profil, se souvient le P^r Bousson. Avec ce nouveau système, deux vues face et profil du patient suffisent. La réduction de dose est énorme. Et on accède enfin à une vue de la stature du patient qui rend possible le travail sur la posture. On peut visualiser les mécanismes de compensation. Les bénéfices concernent aussi la planification chirurgicale et le suivi des pathologies de la colonne, de la hanche ou du genou ». En effet, cette technologie s'accompagne de logiciels spécifiques destinés aux chirurgiens afin que ceux-ci puissent

simuler leurs interventions (évaluer la taille et la position idéales d'un implant à poser, par exemple) mais aussi estimer la manière dont la hanche va se repositionner après la pose d'une prothèse, ou dont la colonne va se déformer après la pose d'une tige en métal, etc.

Des tables de radiologie ultra-modernes

En parallèle, les tables de radiologie, télécommandées et dotées de capteurs plans numériques, se perfectionnent et permettent la réalisation de multiples examens sur le patient allongé (orthopédiques, thoraciques, abdomino-pelviens, etc.). Elles incluent un certain nombre de fonctionnalités et, notamment, des filtres numériques en temps réel. Améliorant sensiblement la qualité de l'image, ces tables couvrent aujourd'hui le corps entier du patient et évitent d'avoir à déplacer ce dernier. Grâce à ces évolutions, la radiologie conventionnelle est de plus en plus utilisée à des fins thérapeutiques. Les applications sont multiples : embolisation de tumeur ou d'anévrisme, ponction d'un organe... (lire sur le sujet le chapitre sur la thérapie guidée par l'image en pages 32-37).

Les rayons X à haute et basse énergies pour aller plus loin

Depuis les années 80, l'absorptiométrie biphotonique à rayons X (DXA)® permet d'analyser la composition du corps, comme la répartition entre la masse maigre et la masse grasse dans le corps (modifiée en cas d'insuffisance rénale chronique, d'anorexie mentale, d'obésité, de VIH/SIDA ou de fibrose kystique®) ou encore la densité minérale osseuse. Cette technique au nom complexe utilise des rayons X à basse et haute énergies. Peu irradiante, elle s'est perfectionnée au fil des années pour offrir une meilleure qualité d'image, une acquisition d'images plus rapide (inférieure à 30 secondes) et une plus grande précision.

La réduction de dose

Si, à la fin du XIX^e siècle, Wilhelm Röntgen manipule sans précaution les rayons X dont il ne suppose pas les effets sur l'organisme humain, plus personne n'ignore aujourd'hui le danger (radiodermite , cancer...) que représente l'exposition à de fortes doses de rayonnements ionisants.

Pour les fabricants d'équipements de radiographie, le défi consiste à limiter au maximum la dose de rayons X à laquelle le patient est exposé tout en conservant une qualité d'image obtenue suffisante. L'utilisation de capteurs numériques de plus en plus performants y contribue, de même que l'avènement récent de nouvelles technologies de détection basse dose. Les systèmes actuels intègrent également des outils de calcul de la dose avant l'irradiation afin de délivrer la quantité la plus faible possible en fonction des caractéristiques de l'examen et du patient. L'adoption de bonnes pratiques lors de la réalisation de l'imagerie et la connaissance approfondie de leurs appareils par les utilisateurs – médecins, paramédicaux et radiologues – favorisent également la limitation à l'exposition. Ainsi, depuis une dizaine d'années, les doses ont été diminuées de 60 à 70 %.

Essor de l'intelligence artificielle

Depuis le début des années 2000, l'intelligence artificielle (IA) fait son apparition en radiologie. Les objectifs sont multiples. D'une part, obtenir des

La main de Bertha

En 1895, Wilhelm Röntgen, physicien allemand, met en évidence un type de rayonnement jusqu'alors inconnu qu'il baptise rayons X. Le premier objet qu'il soumet à leur action en vue d'obtenir une image sur une plaque photographique est la main de sa femme prénommée Bertha. L'exposition dure 25 minutes. Il observe alors des différences d'absorption selon les matériaux : forte pour les métaux comme l'or de l'anneau que porte son épouse, moyenne pour les os, faible pour les tissus mous. Ses travaux ont un retentissement considérable et immédiat. Et la main de Bertha fait le tour du monde.

images de qualité identique voire meilleure avec toujours moins de doses d'irradiation, grâce à la reconstruction d'images permise par l'IA. D'autre part, accroître la rapidité des examens et de la détection d'éventuelles anomalies.

Des ingénieurs travaillent sur la création de logiciels « experts » capables, en radiologie conventionnelle, de détecter de manière plus rapide et plus sûre des nodules sur des radios du poumon ou du sein. Certains sont d'ores et déjà à même de détecter mais aussi d'interpréter des tumeurs sur des mammographies, c'est-à-dire de proposer aux radiologues un diagnostic (tumeurs malignes ou bénignes).

Enfin, quelques logiciels visent à prédire le risque de développer certaines pathologies. L'un d'eux, élaboré en collaboration avec l'Institut Gustave Roussy, et lancé fin 2015 en Europe, évalue le risque de développer un cancer du sein en s'appuyant sur quatre critères : l'âge de la patiente, les



antécédents familiaux, les biopsies et la densité mammaire. Ce *data mining*, ou « exploration des données », a pour but d'évaluer, pour chaque patiente, la fréquence nécessaire des mammographies de dépistage du cancer du sein.

L'INTÉRIEUR DU CORPS EN 3D

En moins de quarante ans, la tomodensitométrie, qui permet d'observer les organes et les tissus en trois dimensions, est devenue une modalité incontournable d'imagerie médicale. Les innovations technologiques dont elle a bénéficié ont considérablement amélioré ses performances ainsi que la sécurité et le confort des patients.



DE LA THÉORIE...

Dès ses débuts, le scanner, aussi nommé tomodensitomètre (TDM), a été plébiscité par le corps médical pour explorer le cerveau. De fait, il permettait de voir ce qui échappait aux autres modalités d'imagerie, avant la mise au point de l'imagerie par résonance magnétique (IRM). Il est, aujourd'hui, devenu incontournable pour la détection et le suivi de nombreuses pathologies tumorales. Il est en effet capable de reconstituer une vue morphologique de n'importe quelle partie du corps humain, même située en profondeur. Et ce, à partir de multiples coupes, jusqu'à des centaines, voire des milliers, prises sous des vues différentes et obtenues grâce à l'émission de rayons X.

À LA PRATIQUE

Dans certains cas, la réalisation du scanner nécessite au préalable l'injection d'un produit de contraste (souvent à base d'iode). « *Il s'agit d'une substance qui opacifie certains éléments du corps, pour les rendre visibles sur les images prises durant l'examen* », rappelle l'Assurance maladie. Il « *permet de repérer plus facilement les anomalies* », complète l'Institut national du cancer (INCa). Pendant l'examen, le patient est allongé, « *le plus souvent sur le dos, les bras tendus au-dessus de la tête* », sur une table placée au centre d'un large anneau, poursuit l'Institut. Un tube et un détecteur de rayons X, positionnés au sein de cet anneau et de part et d'autre du patient, tournent autour de ce dernier,

Au 1^{er} janvier 2019, la France compte 1263 scanners installés (avec autorisation des Agences régionales de santé), selon les chiffres du Snitem.

tandis que la table se déplace lentement à une vitesse constante. Concrètement, l'appareil mesure l'absorption des rayons X par les différents tissus de l'organisme pour reconstituer les structures anatomiques du patient, en trois dimensions.

En effet, alors que la radiographie par rayons X livre des images en seulement deux dimensions, le scanner autorise l'exploration de volumes car le corps est radiographié par coupes successives. La superposition de ces coupes permet de reconstituer une image en 3D des différents organes en fonction de leur densité. À cet égard, il se rapproche de l'IRM, autre modalité d'imagerie en trois dimensions (*lire sur le sujet le chapitre sur l'IRM en pages 38-44*). Le scanner a toutefois ses atouts propres, en particulier une excellente résolution spatiale obtenue à force d'innovations technologiques. Dans les pays développés, son usage connaît ainsi une forte croissance.

UNE HISTOIRE D'INNOVATION

La tomodensitométrie, mise en œuvre par les scanners, est une technique d'imagerie qui n'a eu de cesse d'évoluer depuis son invention en 1971

puis son apparition dans les hôpitaux français voilà quarante ans. Les premiers prototypes réalisent des images en coupes du cerveau et du crâne (uniquement) à partir de mesures du rayonnement résiduel capté par une série de détecteurs disposés en arc de cercle autour de la tête.

À la fin des années 70, la technique progresse et permet l'examen du corps entier. Les scanners sont composés d'un anneau qui tourne autour du patient et qui comporte de façon diamétralement opposée un tube à rayons X et un nombre restreint de détecteurs. La table sur laquelle le patient est allongé se déplace de quelques millimètres au sein de l'anneau avant d'être immobilisée pour la prise d'images sur 360 degrés, puis se déplace à nouveau, et ainsi de suite.

« Avec les premiers appareils, l'acquisition d'images était très lente, de l'ordre de 5 à 10 secondes par tour pendant lesquelles il ne fallait surtout pas bouger », se souvient le Pr Jacques Rémy, membre du service de radiologie du CHRU de Lille. « On obtenait des coupes de quelques millimètres d'épaisseur tous les centimètres, de sorte que l'on disposait d'informations seulement sur une partie de l'organe ».

C'est pourquoi les scanners dits « spiralés », apparus dans les années 90, ont représenté >>>

« Les applications cardiaques sont le moteur des innovations du scanner »>

D^r Jean-François Paul, radiologue au sein de l'Hôpital américain de Paris (Neuilly-sur-Seine) et de l'Institut mutualiste Montsouris (Paris)

« Le scanner est en train de prendre une place de plus en plus importante pour le diagnostic des coronaropathies et l'évaluation du muscle cardiaque. Pour faire du scanner coronaire, la technologie 64 coupes est le minimum requis. La résolution temporelle élevée des machines actuelles permet de procéder à l'examen pour n'importe quel patient, quel que soit son rythme cardiaque. Les nouveaux scanners et techniques de synchronisation, avec l'électrocardiogramme, permettent d'imager le cœur entier en un seul battement, ce qui améliore notablement la qualité diagnostique. Les applications cardiaques sont désormais le moteur des innovations du scanner. »

1971

Premier scanner clinique réalisé à Londres sur un patient présentant un kyste cérébral

1973

Apparition du scanner dans les hôpitaux français

1980

Premiers scanners séquentiels permettant de cartographier le corps entier

1990

Apparition des scanners volumiques ou spirales

2000

Apparition du scanner multibarrette®

»» un progrès significatif. L'émission des rayons X est désormais continue et l'anneau tourne en permanence tandis que la table d'examen progresse à vitesse constante en son centre. Dans cette configuration, il ne faut plus qu'une fraction de seconde pour obtenir une coupe.

Puis, dans les années qui ont suivi, le nombre de détecteurs a évolué vers quelques dizaines voire des centaines. « Cette technique a ouvert des perspectives considérables dans la détection et la caractérisation des nodules pulmonaires », poursuit le Pr Jacques Rémy. Elle est à l'origine de l'initiative du dépistage du cancer bronchique par le scanner. »

La « course aux barrettes »

Progressivement, les détecteurs, en nombre croissant, ont été rassemblés en barrettes. D'une barrette unique, on est passé à quatre, puis seize, puis soixante-quatre barrettes, permettant aux machines de faire autant de coupes en un seul tour du système émetteur-détecteur de rayons X présent au sein de l'anneau. Plus le nombre de barrettes augmente, plus l'acquisition d'images

est large et rapide. Le patient, lui, est amené à passer de moins en moins de temps allongé dans le tunnel du scanner.

Le scanner dit « multibarrette », encore appelé « multicoupe », est né et, avec lui, la « course aux barrettes » dont le nombre augmente au fur et à mesure des possibilités technologiques de les multiplier. « Tout va très vite. Le nombre de barrettes augmente tous les deux ans en moyenne », observe le Dr Jean-François Paul, radiologue au sein de l'Hôpital américain de Paris (Neuilly-sur-Seine) et de l'Institut mutualiste Montsouris (Paris). « Aujourd'hui, les machines les plus puissantes comportent 320 barrettes. D'autres sont équipées de deux tubes émetteurs de rayons X, ce qui permet aussi une acquisition accélérée. »

Ces dernières années, la tendance n'est plus à la « course aux barrettes » mais au développement de scanners aux larges détecteurs et aux spirales rapides, pour obtenir l'image volumique d'une articulation, d'un foie, d'un cœur ou encore d'un crâne en un tour et « en 0,35 secondes, voire moins », selon le Pr Alain Blum, chef du service d'imagerie Guilloz du CHU de Nancy. « De tels équipements

technologiques sont capables de balayer des organes mesurant jusqu'à 16 centimètres », confirme le Dr Jean-François Paul.

L'enjeu de la réduction des doses

Parallèlement à ces innovations technologiques, industriels et chercheurs, conscients des effets néfastes pour la santé de l'exposition à des rayonnements ionisants, se sont attachés à proposer des examens scanographiques de moins en moins irradiants pour le patient. Objectif : rechercher l'efficacité optimale au moindre risque. « Les doses d'irradiation diminuant, les prescriptions de scanner augmentent et concernent des patients qui n'auraient pas pu en bénéficier hier », constate le Pr Rémy. C'est vrai notamment en pédiatrie où il importe d'irradier le moins possible des organes en cours de développement et pour les femmes enceintes en raison des risques de malformation du fœtus dus aux rayonnements ionisants. Sur le marché de la tomographie par ordinateur (TDM) se sont donc développés depuis les années 90

2002

Premières utilisations du scanner pour établir un diagnostic des coronaropathies

2006

Premières utilisations de scanners double énergie

2010

Essor des algorithmes itératifs de reconstruction de l'image

2015

Premiers scanners double énergie à comptage de photons X à des fins de recherche clinique

2016

Premier scanner spectral multibarrette à détecteurs double couche (en version commerciale)



des méthodes et des outils pour réduire la dose de rayonnements ionisants à son minimum utile. Des équipements servant à moduler la dose en fonction de la taille et de la morphologie du patient, ou encore de son électrocardiogramme, ont ainsi vu le jour. D'autres visent à limiter l'irradiation des organes sensibles.

Algorithmes de reconstruction itérative

Plus récemment, des méthodes itératives de reconstruction des images sont apparues. Ces méthodes, numériques, consistent à réduire le bruit de l'image, c'est-à-dire toutes les données parasites, sans affecter sa résolution spatiale. Cette technique, très gourmande en calculs mathématiques, correspond à une sorte de nettoyage et fournit des images de bonne qualité à faible dose de rayonnements ionisants.

« D'ici quelques années, assure le Pr Rémy, la dose de rayons X reçue lors d'un scanner pulmonaire sera équivalente à celle d'une radiographie du poumon. Soit une fraction de la dose moyenne »>>>

0,25

seconde

Chiffre clé

C'est le temps mis par les scanners les plus rapides pour effectuer un tour complet du patient.

Source : Constructeurs.



« L'outil d'imagerie de référence pour le poumon »

P^r Jacques Rémy, radiologue au CHRU de Lille

« Le scanner est aujourd'hui très sensible à la moindre anomalie du poumon, ce qui en fait l'outil d'imagerie de référence pour cet organe. Quand les machines étaient très lentes, la respiration et les mouvements cardiaques ébranlaient les poumons et rendaient difficiles l'interprétation des images. Mais aujourd'hui, obtenir l'image du poumon immobile ne prend qu'une fraction de seconde. Les patients n'ont plus besoin de bloquer longtemps leur respiration. Cela n'a l'air de rien mais pour les enfants notamment, c'est une véritable avancée. »

» que tout un chacun reçoit naturellement chaque année, à savoir 3 millisieverts. »

En attendant, « les algorithmes de reconstruction itérative sont devenus plus sophistiqués, avec des temps de reconstruction acceptables, c'est-à-dire qui ne ralentissent plus le flux de patients reçus par les radiologues », pointe le P^r Blum. En effet, « les scanners actuels permettent l'acquisition de 30 voire 80 images par seconde », détaille-t-il. Certains sont même dotés d'algorithmes de reconstruction itérative "totalement statistiques" dits "model-based" – c'est-à-dire calqués sur un modèle – qui tiennent compte de la géométrie du scanner et des principes physiques des rayonnements », poursuit-il. Ces technologies s'avèrent particulièrement utiles pour « améliorer la qualité de l'image et réduire la dose d'irradiation ». De fait, en dix ans, la dose d'irradiation a baissé de près de 70%. L'objectif : « atteindre un équilibre entre faible dose de radiation et qualité optimale de l'examen », synthétise le P^r Blum.

Par ailleurs, les constructeurs proposent désormais des outils d'optimisation du centrage du patient dans l'anneau, parfois basés sur l'intelligence artificielle. « En effet, lorsque la région anatomique à examiner n'est pas bien centrée sur la table, nous perdons en rapport signal sur bruit, c'est-à-dire en qualité de transmission des images et en résolution spatiale », explique le P^r Blum. De la même manière, « l'intelligence artificielle, que l'on voit apparaître dans le secteur de l'imagerie, devrait être prochainement utilisée pour réduire le bruit de l'image ».

L'essor de l'imagerie spectrale

Enfin, ces dernières années, une autre étape a été franchie avec l'arrivée des scanners double énergie, également dénommés bi-énergie, en 2016. Si leur utilisation relève initialement surtout de la recherche clinique, depuis 2016, les applications de routine se développent. Ces appareils sont capables d'émettre des rayons X selon plusieurs niveaux d'énergie (haut et bas kilovoltage). Sachant que les tissus répondent de façon spécifique selon le niveau d'énergie du rayonnement qui les traverse, l'objectif est de pouvoir étudier distinctement soit les structures osseuses et calciques, soit les vaisseaux, soit les tissus mous, etc. « Ces scan-

ners sont prometteurs », estime le Pr Blum. « Il en existe aujourd'hui de trois sortes. Certains disposent de 2 tubes à rayons X, pour une émission à haute énergie et une émission à basse énergie. D'autres ne possèdent qu'un seul tube, qui émet alternativement une haute et une basse énergies. D'autres encore possèdent une double couche de détecteurs. » Les scanners spectraux les plus haut de gamme sont même capables de fournir des données quantitatives sur l'absorption de l'iode en mg/mL.

Résultats de cette imagerie dite spectrale : moins d'artefacts[®], une meilleure résolution des images et une moindre irradiation des patients. En plein essor, l'imagerie spectrale permet des diagnostics plus précis et précoces dans des contextes oncologiques[®] ou d'urgence. Elle permet, en outre, grâce à certains logiciels de pointe, d'aller au-delà d'une simple visualisation standard en différents niveaux de gris et d'accéder à de nouvelles données en couleur, pour repérer plus facilement le caillot de sang d'une embolie pulmonaire ou les zones obstruées secondaires à un accident vasculaire cérébral (AVC)[®] ou à un infarctus, par exemple. De plus, depuis 2015, les dernières générations de scanners double énergie incluent des détecteurs à comptage de photons X (qui constituent les rayons X). Inaugurées à Lyon à des fins de recherche clinique, elles ont la capacité de sélectionner et de classifier les photons X en fonction de leur niveau d'énergie. Et ce, afin d'améliorer encore la résolution et l'analyse des éléments traversés par les rayons X. Elles permettent, elles aussi, d'obtenir des clichés en

couleurs et de réduire la dose de rayons X émise. « Ces technologies ne sont pas encore prêtes pour l'exploration chez l'homme, mais ses applications sont, là aussi, potentiellement très intéressantes », souligne le Pr Blum. Elles pourraient faciliter l'évaluation d'un risque d'AVC ou d'infarctus du myocarde dans le cadre de campagnes de dépistage, ou d'un risque de fracture osseuse, grâce à une précision inférieure au dixième de millimètres de l'organisation architecturale de l'os.

La voie de l'imagerie fonctionnelle

Hier outil purement morphologique, le scanner s'aventure, grâce à ces innovations, sur la voie de l'imagerie fonctionnelle. « Avec ces machines, on est capable d'étudier la perfusion et la ventilation du poumon », explique par exemple le Pr Rémy. « Avant l'examen, le patient respire un gaz sans effet toxique dont on suit ensuite la dispersion dans les poumons ».

L'étude de la diffusion du produit de contraste dans l'organisme grâce au scanner présente également un intérêt en neurologie, par exemple pour le diagnostic et le suivi de l'AVC ou encore des tumeurs cérébrales. « Ce type d'imagerie dite "de perfusion", couplée à "l'imagerie des vaisseaux sanguins", c'est-à-dire l'angiographie, permet d'augmenter de façon majeure le contraste des images ainsi que la détectabilité des lésions à bas contraste », complète le Pr Blum, qui voit dans cette technique une véritable voie d'avenir.



TOMOGRAPHIE PAR ÉMISSION DE POSITONS (TEP)

UNE ARME ANTICANCER... MAIS PAS SEULEMENT

En l'espace de seulement dix ans, la tomographie par émission de positons (TEP) a révolutionné la prise en charge du cancer. Forte de son succès, cette modalité d'imagerie fonctionnelle au cœur de la médecine nucléaire suscite aujourd'hui l'intérêt de plusieurs autres spécialités médicales.



DE LA THÉORIE...

La tomographie par émission de positons (TEP) est une modalité d'imagerie fonctionnelle en trois dimensions utilisée en médecine nucléaire. Son principal intérêt réside dans sa capacité à quantifier l'activité métabolique des cellules. La lecture des clichés permet aux médecins de différencier les tissus sains des tumeurs malignes et de leurs métastases. « La TEP a révolutionné la prise en charge du cancer », estime le Pr Patrick Bourguet, médecin nucléaire au Centre de lutte contre le cancer (CLCC) Eugène Marquis (Rennes). « Lors du diagnostic, elle est indiquée pour faire un bilan d'extension initial de la tumeur. » Elle permet en effet d'évaluer l'étendue de la tumeur en question et la présence ou non de métastases. « En ce qui concerne les ganglions, le scanner dira s'ils sont petits ou gros, autrement dit de taille normale ou pas,

avec un risque d'erreur une fois sur trois. La TEP, elle, révèle s'ils sont cancéreux ou pas », complète le Pr Bourguet. « On se sert aussi de la TEP pour diagnostiquer les récurrences de cancer le plus tôt possible, lorsque les amas tumoraux sont encore de très petite taille. Elle est par ailleurs de plus en plus utilisée pour évaluer la réponse de la tumeur à un traitement et pour adapter la posologie recommandée. Depuis quelques années, la TEP numérique, qui repose sur l'utilisation de détecteurs numériques, se développe. »

À LA PRATIQUE

La TEP repose sur le principe général de la scintigraphie. La technique consiste à suivre, à l'aide d'une caméra à positons, le rayonnement (les photons) émis par un traceur radioactif, également appelé radiotracteur[®], injecté dans l'organisme du patient. Celui-ci se compose d'un élément chimique

Le principe de la TEP et les prototypes de caméra TEP voient le jour dans les années 50 aux États-Unis.

radioactif, qui se désintègre progressivement, couplé à un traceur choisi pour ses propriétés physiologiques. Par exemple, s'il s'agit de suivre l'activité de cellules cancéreuses, grandes consommatrices de sucre, l'élément radioactif de choix est l'isotope 18 du fluor incorporé dans une molécule d'analogue de glucose. L'ensemble forme le fluorodésoxyglucose (FDG) marqué au fluor 18, qui est de loin le traceur actuellement le plus utilisé en imagerie TEP. Il est particulièrement bien adapté pour caractériser un lymphome ou un cancer du poumon ainsi que la grande majorité des tumeurs, à l'exception notable du cancer de la prostate pour lequel les médecins lui préfèrent la choline.

Aux doses utilisées, la radioactivité ne présente aucun danger pour le patient. « *Le FDG n'a aucun effet secondaire* », confirme le Pr Bourguet. L'examen a lieu dans un service hospitalier de médecine nucléaire et nécessite une caméra TEP.

UNE HISTOIRE D'INNOVATION

La tomographie par émission de positons (TEP) est une technique de scintigraphie qui ne date pas d'hier. Le principe voit le jour dans les années 50

« Un processus typique »

Pr Patrick Bourguet, médecin nucléaire au Centre Eugène Marquis (Rennes)

« Issue de la recherche, la technique a su trouver une première application clinique de grande échelle en cancérologie. Celle-ci a nécessité des équipements en machines et suscité des investissements considérables de la part des industriels. Les produits ont alors fait des sauts technologiques majeurs, qui bénéficient aujourd'hui à d'autres pathologies. Actuellement, la demande, les applications et les traceurs sont là. Et la recherche fourmille. »

aux États-Unis. Jusqu'à la fin des années 70, en France, seuls les centres de recherche en neurosciences de Lyon, Caen et Orsay y ont recours pour explorer, à des fins de recherche, les différentes pathologies neuropsychiatriques humaines. De nombreux traceurs sont testés pendant cette période sans qu'aucune application clinique évidente n'émerge. Il faut attendre la toute fin du siècle dernier pour que soit validée l'utilisation du FDG en cancérologie, et quelques années de plus pour assister aux premières imageries TEP effectuées en médecine nucléaire. « *La première caméra TEP made in France date de la fin des années 90* », se souvient Jean-François Chatal, professeur émérite en médecine nucléaire à l'Université de Nantes. Rapidement germe l'idée, qui perdure encore aujourd'hui, de coupler

la caméra TEP à un scanner. L'ensemble, nommé TEP Scan, tourne autour du patient et permet de reconstituer l'image en trois dimensions de la zone étudiée. « *À l'époque, il fallait compter une heure par patient, et les machines en traitaient huit par jour* », se rappelle le Pr Bourguet. « *Aujourd'hui, elles sont plus précises et plus sensibles, si bien que l'examen est beaucoup moins long puisqu'il ne faut plus que vingt minutes pour le réaliser. En outre, en dix ans, la réduction des doses en radiotraceurs est d'environ 30 %* ».

La cancérologie comme tremplin

Même si son utilisation en cancérologie est à l'origine du développement de la TEP en >>>

1950

Premiers prototypes de caméra TEP

1970

Développement de la TEP et utilisation des premiers radiotraceurs pour la recherche en neurosciences

1990

Validation de l'utilisation clinique du FDG en cancérologie

2000

Construction des premiers TEP Scan qui deviennent le standard de référence

»» médecine nucléaire, la TEP n'est pas cantonnée à cette seule spécialité. « *En neurologie, la TEP au FDG permet de visualiser les circuits de transmission de neurotransmetteurs, comme la dopamine ou la sérotonine* », explique le Pr Patrick Bourguet. « *Elle contribue déjà au diagnostic de certaines formes d'épilepsie et de démence* ».

De son côté, le rubidium 82[®] est par exemple de plus en plus utilisé aux États-Unis pour visualiser l'activité cardiaque (on parle de TEP de perfusion du myocarde). Par ailleurs, d'autres radiotraceurs suscitent de l'intérêt pour révéler et quantifier divers phénomènes cellulaires. En cancérologie d'abord : « *Le cuivre 64 couplé à une petite molécule appelée ATSM semble être un bon marqueur de l'hypoxie tumorale* », affirme le Pr Jean-François Chatal. « *À l'avenir, on pourrait s'en servir pour renforcer la dose d'irradiation de radiothérapie là où la tumeur est peu oxygénée. Au niveau moléculaire, des radiotraceurs permettant de visualiser l'angiogénèse (formation de nouveaux vaisseaux tumoraux) ou l'apoptose (mort programmée d'une cellule) pourraient également arriver bientôt sur le marché* ».

Bientôt des cyclotrons « de poche »

La France compte plus de 20 cyclotrons[®] (c'est-à-dire des accélérateurs de particules) assurant principalement la production de fluor 18 pour la médecine nucléaire. Ces équipements de pointe occupent des surfaces de plusieurs dizaines de mètres carrés, à distance des services de médecine nucléaire dans lesquels les patients sont pris en charge. Aussi faut-il transporter les traceurs d'un endroit à l'autre. Pendant le trajet, une quantité non négligeable de radioactivité décroît et le radio-traceur devient inutilisable pour l'imagerie. Pour contourner le problème, des industriels commencent à proposer des cyclotrons adaptés au gabarit d'une pièce standard. Objectif : produire sur place et à la demande les marqueurs nécessaires à l'imagerie et aux traitements de médecine nucléaire. Cette proximité, couplée à l'arrivée de TEP numériques (c'est-à-dire dotés d'une caméra numérique et non plus analogique), rend possible l'utilisation de nouveaux traceurs à durée de vie très courte.

Essor du TEP Scan et du TEP-IRM

Depuis 2014, l'offre d'appareils de TEP se diversifie afin de s'adapter aux besoins cliniques des professionnels de santé libéraux, hospitaliers ou des centres de lutte contre le cancer. Les plus récents permettent ainsi de visualiser des structures pathologiques de très petite taille (moins de 1 millimètre) grâce à des détecteurs plus sensibles et, pour certains, numériques. Ils facilitent ainsi la détection des lésions et le diagnostic précoce grâce à une meilleure qualité d'image. Ils permettent également de réduire les temps d'examen et de diminuer par deux voire presque trois la dose de radiotraceur utilisée. La juxtaposition des images se fait automatiquement.

Certains de ces appareils sont également couplés à d'autres modalités d'imagerie, marquant ainsi une nouvelle ère en matière de performances cliniques, notamment en médecine nucléaire. C'est le cas du TEP Scan, dont les dernières générations sont numériques.

Milieu des années

2000

Premiers usages cliniques de l'imagerie TEP

2014

Diversification des appareils et de leurs fonctionnalités

2015/16

Installation des premiers TEP-IRM français



110

minutes

Chiffre clé

C'est la durée de la demi-vie du fluor 18, c'est-à-dire le temps au terme duquel il ne restera plus que la moitié de la radioactivité initiale de ce radiotracer. Autrement dit, la quasi-totalité de l'activité disparaît en moins de douze heures, ce qui laisse peu de temps après la production du radiotracer pour pratiquer l'imagerie par TEP.

Source : Radioprotection : radionucléides – Fluor 18, Institut national de recherche et de sécurité (INRS).

La dernière innovation en date consiste à remplacer le scanner par un appareil d'IRM, pour former un appareil de TEP-IRM. En France, les premières machines du genre sont inaugurées en 2015-2016. Ainsi, en septembre 2015, l'hôpital de la Pitié-Salpêtrière (Paris) s'équipe d'un TEP-IRM destiné à « *une activité de clinique* » en neuroradiologie diagnostique et fonctionnelle, mais aussi « *de recherche* », centrée sur les maladies du système nerveux (maladie d'Alzheimer, troubles du mouvement et maladie de Parkinson, sclérose latérale amyotrophique[®], épilepsie, ainsi que pathologie cancéreuse neurologique ou générale). En avril 2016, le Centre d'étude et de recherche multimodal et pluridisciplinaire (CERMEP) de Lyon dévoile sa propre machine. « *Cet instrument de pointe offre aux scientifiques et aux médecins un nouvel outil pour la compréhension des mécanismes du vivant et des pathologies : les maladies neuro-dégénératives, psychiatriques, cardio-vasculaires et les cancers* », s'enthousiasment alors les promoteurs du projet (dont l'Université Claude Bernard Lyon 1, l'Inserm et le CNRS).

Le déploiement de tels imageurs hybrides est assez lent, en France comme dans le reste du monde, mais se poursuit. Récemment, en juillet 2018, le Centre Henri Becquerel (Rouen) se dote ainsi d'un nouvel équipement associant un appareil IRM et un TEP Scan. Les patients sont transportés d'un appareil à l'autre *via* un lit de transfert sur coussin d'air, tout en étant maintenus dans la même position. Une première en Europe.

LES ULTRASONS AU SERVICE DU DIAGNOSTIC ET DU SOIN

Tandis que l'échographie pousse toujours plus loin l'exploration anatomique, de nouvelles technologies utilisant les ultrasons sont en passe de révolutionner le diagnostic mais aussi la prise en charge de certains cancers, des hépatites ou encore du glaucome.



DE LA THÉORIE...

L'examen échographique est devenu incontournable pour suivre le développement du fœtus et le déroulement de la grossesse. Un tel usage est relativement récent puisqu'il n'a qu'une quarantaine d'années. Il permet aussi de visualiser les organes situés au niveau de l'abdomen, du bassin, du cou, mais aussi les vaisseaux (artères et veines), les ligaments/muscles et le cœur, afin de détecter une infection, une malformation ou une tumeur.

À LA PRATIQUE

Modalité d'imagerie anatomique et fonctionnelle, l'échographie fournit une vue de l'intérieur du corps

humain en deux voire trois dimensions – et même quatre dimensions spatiales et temporelles à partir de l'émission d'ultrasons de faible intensité. Générées par une sonde posée sur le corps, les ondes (en l'occurrence les ondes dites de compression ) traversent les milieux liquides à la vitesse de 1500 mètres par seconde. Elles rebondissent sur les tissus qu'elles rencontrent à la manière d'une balle de tennis. La sonde capte ces échos et les transmet à un appareil qui assure leur conversion en signaux vidéo, dessinant à l'écran l'image de la zone étudiée. Pour réaliser cette prouesse technologique, les sondes, nommées « barrettes échographiques », sont aujourd'hui composées de centaines de transducteurs ultrasonores, à savoir des cristaux

piézoélectriques (jusqu'à 3000 en échographie cardiaque pour des acquisitions volumiques).

UNE HISTOIRE D'INNOVATION

L'hypersonographie : c'est ainsi que l'Autrichien Karl Dussik, médecin, et son frère Friederick, physicien, appellent en 1947 leur technique de diagnostic médical utilisant les ultrasons pour visualiser les ventricules cérébraux. Avant eux, personne n'a encore eu l'idée d'exploiter les caractéristiques de ces ondes à des fins médicales. Quelques années plus tard, en 1951, le premier échographe voit le jour en Grande-Bretagne, destiné à la recherche de tumeurs cérébrales.

La révolution du balayage électronique

Utilisés en routine pour la clinique depuis le début des années 70, les premiers échographes sont équipés de sondes monovoie, c'est-à-dire capables d'émettre des ondes dans une seule direction. Les images sont obtenues très lentement en promenant la sonde à la surface du corps.

« Une première révolution est survenue à la fin des années 70 grâce aux progrès de l'électronique et au développement de l'informatique, donnant un coup d'accélérateur à la reconstruction d'images. Les barrettes multi-éléments permettent d'effectuer des balayages électroniques qui fournissent en un temps de plus en plus court des données de plus en plus

nombreuses », explique Jean-Yves Chapelon qui dirige, à l'Inserm à Lyon, le laboratoire Thérapies et applications ultrasonores. À la même époque, les signaux numériques, qui peuvent être stockés, font leur apparition et les capacités de mémorisation des données augmentent rapidement.

En quelques années, le numérique envahit les appareils et supplante le traitement d'images analogiques. En parallèle, les séquences d'images s'accroissent jusqu'à permettre l'acquisition en temps réel.

L'avènement de l'écho-doppler

À la même époque, un autre examen utilisant les propriétés des ondes sonores voit le jour : le doppler, qui s'appuie sur l'effet du même nom décrit au XIX^e siècle par un physicien autrichien. Couplée à l'échographie classique, la technique dite écho-doppler fournit une imagerie fonctionnelle qui explore les caractéristiques du flux sanguin dans le cœur et dans les vaisseaux. Elle est aujourd'hui très pratiquée en médecine vasculaire et permet de repérer ou, au contraire, d'éliminer l'hypothèse de pathologies telles que la thrombose, la phlébite , la sténose  ou l'anévrisme. Pour cela, la sonde doppler, posée sur la peau, émet des ultrasons qui traversent la cavité cardiaque et les parois des vaisseaux avant d'être réfléchis par les globules rouges dont on peut alors suivre la vitesse, le trajet et les turbulences. >>>

De la 3D à la 4D

L'échographie en quatre dimensions (4D) est de plus en plus performante grâce à des sondes de plus en plus puissantes. Les avantages sont nombreux. En effet, en obstétrique, l'échographie en 2D montre des coupes du fœtus dans le ventre de la femme enceinte, et l'échographie en 3D permet de naviguer à travers ces coupes afin de détecter des malformations éventuelles du fœtus. Avec à l'échographie en 4D, les radiologues visualisent le fœtus en relief et en temps réel.

En cardiologie, elle permet, toujours en temps réel, d'observer le volume du cœur et d'affiner le choix d'implant ou de valve cardiaque pour chaque patient. Grâce à elle, le cardiologue et le chirurgien peuvent suivre les contractions du cœur et des valves cardiaques, le flux du sang (voire le reflux, en cas de défaut de fonctionnement d'une valve) et les zones précises sur lesquelles intervenir chirurgicalement.

1951

Premier échographe destiné à la recherche de tumeurs cérébrales

1970

Premiers échographes unidirectionnels et apparition du doppler

1974

Première échographie obstétricale en France

Fin des années

1970

Apparition des barrettes multi-éléments

Années

1980/90

Développement de l'échographie fonctionnelle



L'échographie devient fonctionnelle

À partir des années 80, et plus encore dans la décennie 90, les technologies de reconstruction d'images sont suffisamment performantes pour que l'échographie elle-même devienne fonctionnelle. On ne se contente plus d'explorer la biométrie des différents organes : on peut désormais assister en direct à l'activité du muscle cardiaque, aux mouvements du fœtus ou à la réaction d'un tissu sous l'effet d'un geste.

À ce jour, tous les organes mous tels que le foie, les reins, la vessie, la prostate ou les muscles peuvent être explorés par échographie. Il est même possible de réaliser des dopplers transcrâniens pour étudier

les principaux flux sanguins cérébraux, voire des échographies thoraciques pour diagnostiquer certaines pathologies du poumon (atélectasie [@](#), pneumothorax [@](#), etc.).

L'intérêt des microbulles

Les progrès technologiques et le coût de plus en plus abordable des composants électroniques permettent de repousser les limites de l'échographie. Les sondes ultrasonores deviennent de plus en plus petites, ce qui ouvre la voie à de nouvelles explorations des organes digestifs, à l'aide d'endoscopes, mais aussi intravasculaires, y compris au niveau des artères coronaires qui mesurent moins de cinq millimètres.

Au commencement était le sonar

Bien avant leur utilisation médicale, les ultrasons ont connu un destin militaire. Dès la Première Guerre mondiale, les propriétés de propagation et de réflexion dans l'eau des sonars sont exploitées pour localiser les sous-marins ennemis. L'invention découle des travaux du physicien français Paul Langevin. Alors que des essais sont effectués dans la baie de Toulon, des poissons morts remontent à la surface. L'idée germe alors d'utiliser les ultrasons pour détruire des cellules vivantes et traiter certaines maladies. L'échographie, quant à elle, voit le jour après la Seconde Guerre mondiale.

2003

Premier dispositif d'élastographie

2008

Premiers échographes utilisant les ondes de compression et de cisaillement

2010

Premiers échographes ultra-portables

2017

Première tentative réussie de télé-échographie

En outre, en cancérologie, en particulier à l'hôpital, on a aujourd'hui recours à l'échographie dite de contraste, technique non invasive qui augmente la sensibilité de détection et de caractérisation des tumeurs. Cette modalité utilise des produits de contraste, des microbulles, qui améliorent l'intensité du signal recueilli. Injectés en intraveineuse, ils se fixent préférentiellement sur les tissus largement irrigués. Or, les tumeurs et les métastases sont plus vascularisées que les tissus sains.

Plus récemment, les techniques de *wash-in* (remplissage) et de *wash-out* (vidange) des produits de contraste contribuent à définir les caractéristiques des échanges sanguins dans les tissus tumoraux. « *L'enjeu est important puisqu'il s'agit de poser un diagnostic et de suivre une pathologie de la manière la moins invasive possible mais avec une précision optimale* », souligne Jean-Yves Chapelon. « *Pour un patient atteint d'un cancer de la prostate, le jour où l'échographie de contraste deviendra systématique en lieu et place des biopsies, ce sera pour lui la fin des ponctions.* »

La détection micro-vasculaire

Il est à noter que les fabricants et les chercheurs travaillent également à la détection des micro-flux dans des micro-vaisseaux tumoraux sans recourir à l'injection de produit de contraste. Les techniques les plus récentes, lancées en 2016, permettent de visualiser avec précision l'architecture vasculaire d'un organe ou d'une lésion, grâce à la technique de l'écho-doppler et des dopplers microvasculaires de haute résolution et de haute sensibilité. Les applications, en cancérologie et en pédiatrie par exemple, sont nombreuses. En effet, ces nouveaux doppler sont capables, bien souvent, de supprimer une grande partie des artefacts de mouvement, facilitant ainsi l'examen des tout-petits qui ne peuvent rester en apnée ou respirer calmement.

Essor de l'échographie multimodale

« *Peu à peu, l'échographie est devenue très multimodale et a permis d'obtenir un très grand nombre*



d'informations », ajoute le P^r Valérie Vilgrain, chef du service de radiologie de l'hôpital Beaujon (Paris). En effet, après l'écho-doppler et l'échographie de contraste, la technique de l'élastographie s'est développée sur des échographes dès 2008. Des modules d'élastographie ont progressivement été associés aux échographes. Ceux-ci utilisent >>>

L'élastographie, une « sismologie du corps »

L'histoire de cette nouvelle technique débute en 1987, au Japon et aux États-Unis. Jusqu'à cette date, on pensait que les ondes de cisaillement \ominus , mises en évidence par les sismologues, ne pouvaient pas circuler dans le corps humain, à la différence des ondes de compression \oplus . De fait, aux fréquences ultrasonores, seules les ondes de compression voyagent dans les tissus biologiques tandis que les ondes de cisaillement sont très vite absorbées. Aussi a-t-il fallu attendre que les capteurs et les systèmes de détection des échographes gagnent en sensibilité et en rapidité pour pouvoir les visualiser. C'est en 2003 que le premier dispositif d'élastographie ultrasonore a été commercialisé. L'élastographie utilise aujourd'hui ces ondes de cisaillement aux fréquences ultrasonores pour identifier des zones anormalement dures, à l'instar des nodules ou des tumeurs.

» des ondes non pas de compression mais de cisaillement, générées par ultrasons (pression de radiation) ou à l'aide d'un vibreur, pour mesurer la dureté des tissus au niveau de nombreux organes comme le foie, les seins, la thyroïde ou encore l'appareil musculo-squelettique. « *Ils apportent ainsi des éléments de caractérisation essentiels à la précision diagnostique* », affirme le Pr Vilgrain, qui rappelle que « *la dureté du foie est très bien corrélée à la fibrose du foie* », par exemple. L'élastographie par ondes de cisaillement est de fait un biomarqueur ultrasonore.

Aujourd'hui, l'imagerie multi-ondes permet d'obtenir de nouvelles images du corps humain et de l'élasticité des organes, avec un contraste et une résolution inégalés jusqu'alors et une précision

inférieure au millimètre. Si bien qu'aujourd'hui, on est capable de mieux caractériser les tumeurs, mais aussi de mesurer le degré de fibrose du foie ou d'évaluer l'efficacité d'un traitement contre l'hépatite C à l'écran et non plus à partir d'une biopsie. Et ce, d'autant plus que la résolution, la cadence d'acquisition des images et la taille de la zone explorée se sont accrues. La pénétration des ultrasons est également meilleure, afin de pouvoir explorer des tissus plus profonds.

« *En outre, la tendance est à la fusion entre plusieurs modalités d'imagerie, à savoir échographie, scanner et IRM, pour faire de la radiologie interventionnelle* », complète le Pr Vilgrain. « *Les images sont fusionnées grâce à des logiciels de pointe et à l'identification de marqueurs anatomiques de référence ; les radiologues, à l'occasion de la biopsie d'un organe sous échographie, peuvent ainsi préciser leur geste et savoir exactement où placer leur aiguille grâce aux images scanner et IRM prises au préalable.* » Une technique de plus en plus utilisée.



Échographie de haute fréquence

Par ailleurs, depuis le début des années 2000, des sondes ultra haute fréquence arrivent sur le marché (plus de 20 mégahertz jusqu'à 70 mégahertz). Reposant sur le même principe de fonctionnement que l'échographie conventionnelle, elle permet d'obtenir une meilleure résolution d'image (de l'ordre de la dizaine de microns) mais avec une plus faible profondeur de pénétration des ultrasons.

Elle permet d'affiner les diagnostics dans certaines disciplines (ophtalmologie, dermatologie et médecine musculo-squelettique, par exemple), afin d'observer des structures parfois trop petites pour pouvoir être visualisées par l'échographie conventionnelle, le scanner ou l'IRM. Elle trouve aussi sa place en imagerie interventionnelle.

La voie de la miniaturisation

Plus récemment, depuis 2010, se développent des échographes très compacts, « pour des usages qui nécessitent une miniaturisation et une portabilité des appareils », pointe le Pr Vilgrain. Ils présentent un intérêt au sein des véhicules de transports d'urgence ou encore des services de réanimation, pour éviter de déplacer les patients vers les services d'imagerie, par exemple. Ils peuvent également être utilisés par un médecin généraliste pour un contrôle de l'abdomen ou un médecin du sport pour apprécier l'évolution d'une lésion ou d'un hématome – quitte à ce qu'un examen complémentaire soit demandé par la suite si nécessaire. Ces dispositifs, qui se présentent sous la forme

d'une sonde échographique rattachée à une petite tablette numérique servant de récepteur d'images, sont « une aide au diagnostic pour le clinicien », explique ainsi le professeur. Certains professionnels de santé parlent d'ailleurs de stéthoscope moderne ou d'échoscope.

À l'heure actuelle, un grand nombre d'examen peuvent être réalisés avec ce type d'appareil, et permettre ainsi un examen échographique de « débrouillage » de bonne qualité.

Et à l'avenir ?

Les recherches se poursuivent afin de toujours mieux caractériser les lésions et tumeurs sans avoir à réaliser de biopsie, par définition invasive, mais aussi de mieux analyser leur structure et leur texture (élasticité et viscosité), de mieux prédire leur évolution et leur comportement face à un traitement et, ainsi, de mieux identifier le traitement approprié. Les outils informatiques se développent également. Certains sont capables de détecter sur les images échographiques des anomalies (telles que des micro-calcifications) que l'œil humain

ne peut percevoir de prime abord. Ils seront, à terme, capables de faciliter la caractérisation de ces anomalies. Les travaux menés en matière d'intelligence artificielle devraient ainsi, dans les années à venir, apporter une véritable aide au diagnostic de certaines pathologies.



La télé-échographie, une solution aux déserts médicaux ?

En 2017, le Cadmos, laboratoire de recherche en micropesanteur du Centre national d'études spatiales (CNES) à Toulouse, a réalisé la première échographie télé-opérée de Thomas Pesquet, l'astronote français hébergé plus de 200 jours à bord de la Station spatiale internationale (ISS). Pour cette expérience, l'astronote a maintenu une sonde échographique motorisée sur son corps et Philippe Arbeille, professeur de médecine à Tours, en a contrôlé et dirigé le mouvement en manipulant, depuis la Terre, une sonde factice, jusqu'à obtenir des images de bonne qualité. Cette technologie sera prochainement commercialisée dans le civil.

THÉRAPIE GUIDÉE PAR L'IMAGE

QUAND L'IMAGE GUIDE LE GESTE

L'imagerie interventionnelle a aujourd'hui envahi les salles d'opération pour assister les médecins dans leurs gestes thérapeutiques. Pour le plus grand bénéfice des patients, qui gagnent en confort, en sécurité, et rentrent plus vite chez eux.



DE LA THÉORIE...

L'imagerie médicale guide de plus en plus les gestes thérapeutiques effectués à l'intérieur du corps. On parle alors d'imagerie interventionnelle ou de thérapie guidée par l'image. À la différence d'une intervention classique, cette technique, mini-invasive, consiste à poser une endoprothèse, à pratiquer une ponction, à détruire une tumeur, à effectuer une embolisation ou encore à drainer un organe sans « ouvrir » le patient : les chirurgiens et les radiologues interventionnels visualisent avec précision la zone à atteindre grâce à l'imagerie (radiologie conventionnelle, scanner, IRM,

échographie et TEP), qui leur sert également de support pour effectuer leur geste. Ce type d'acte, lorsqu'il est indiqué, présente l'avantage d'être moins traumatisant pour l'organisme et nécessite une anesthésie moins longue, ce qui améliore à la fois la sécurité et le confort du patient et réduit la durée de l'hospitalisation. Plusieurs disciplines médicales bénéficient de ces progrès, telles que la cardiologie, la neurologie ou encore la cancérologie.

À LA PRATIQUE

Deux voies d'accès à l'organe ou au tissu sont possibles et le choix dépend de l'acte envisagé.

Les interventions au bloc opératoire sont de plus en plus « multidisciplinaires et multimodales au profit des patients ».

L'abord se fait soit par les vaisseaux sanguins (voie endovasculaire), soit à travers la peau (voie percutanée) soit, enfin, à travers les voies naturelles (intra-cavitaire). Le guidage par imagerie permet de s'assurer, en temps réel, du bon positionnement de l'extrémité de l'aiguille, du cathéter ou de tout autre dispositif nécessaire au geste *in situ*.

Grâce aux systèmes de fusion d'images, on parvient désormais à recalcr les images obtenues préalablement sur celles disponibles en salle d'intervention, de manière à compiler les informations des différentes vues. Cela consiste, par exemple, à ramener en salle d'angiographie des clichés d'échographie, de scanner ou d'IRM.

UNE HISTOIRE D'INNOVATION

On estime que l'imagerie interventionnelle moderne est née dans les années 60 avec les premières procédures endovasculaires. Le Pr Charles Dotter, radiologue considéré comme l'un des pionniers en la matière, réalise la première dilatation artérielle percutanée en 1964, aux États-Unis, au niveau de l'artère poplitée (qui irrigue le genou,

la jambe et le pied) d'une patiente atteinte de gangrène. Il opère alors sous contrôle angiographique (une modalité d'imagerie des vaisseaux aux rayons X) pour diriger le cathéter et placer le dilateur à l'endroit souhaité. Puis, treize ans plus tard, le Pr Andreas Grünzig, cardiologue, améliore sensiblement la technique en mettant au point la dilatation par ballonnet qui ouvre la voie à l'angioplastie des coronaires (coronaroplastie).

Les techniques d'embolisation

Les techniques d'embolisation sous angiographie sont un peu plus récentes puisque la première d'entre elles est réalisée en 1973. Au fil des années se développe tout un arsenal d'agents d'embolisation, comme les coils. Les neuroradiologues s'approprient cette approche qui permet de prendre en charge les malformations vasculaires hémorragiques et de prévenir certains accidents de type AVC.

« Plusieurs innovations techniques se sont succédées concernant les coils », note le Pr Alain Bonafé, neuroradiologue au CHU de Montpellier. « Parmi les plus récentes, les cages intra-anévrismales permettent de déposer en une seule fois l'équivalent >>>

« L'embolisation a révolutionné le traitement des anévrismes »

Pr Alain Bonafé, neuroradiologue

« Au cours des 20 dernières années, la neuroradiologie interventionnelle a transformé la prise en charge des malformations vasculaires cérébrales, à commencer par celle des anévrismes cérébraux sans rupture. La chirurgie avec craniectomie a progressivement cédé la place à l'embolisation qui est aujourd'hui le traitement de référence. On aborde l'anévrisme à partir d'un point de ponction au niveau de l'artère fémorale, sous contrôle du geste guidé par imagerie aux rayons X relayée à l'écran. Les résultats sont excellents et les effets secondaires moins nombreux. Le gain pour les patients est également symbolique car il n'est plus nécessaire d'ouvrir la boîte crânienne. »

1964

Premières dilatations artérielles guidées par artériographie

1992

Première utilisation de coils sous angiographie pour traiter les anévrismes intracrâniens

Fin des années

1990

Essor des thérapies par ultrasons focalisés guidées par imagerie

2008

Première utilisation de l'IRM interventionnelle pour traiter une tumeur cérébrale

» de plusieurs dizaines de ces dispositifs dans les vaisseaux cérébraux, tandis que les systèmes de diversion de flux servent à reconstruire le vaisseau porteur. » Les chercheurs travaillent également à mettre au point de nouveaux agents liquides d'embolisation sous forme de gel avec certaines propriétés de viscosité ou d'opacité.

En cancérologie

La cancérologie bénéficie aussi largement des apports de l'imagerie interventionnelle, d'abord pour diagnostiquer les tumeurs au moyen de biopsies effectuées par voie transcutanée, puis pour traiter certaines tumeurs.

« La première chimioembolisation remonte au début des années 80 et a introduit la possibilité de procéder à des traitements du cancer par radiologie interventionnelle », rappelle le Pr Vincent Vidal, directeur du laboratoire d'imagerie interventionnelle expérimentale de l'Université Aix-Marseille. Par la suite, d'autres traitements voient le jour, administrés à l'aide d'une aiguille positionnée en percutané.

La thermoablation, qui recourt à des courants électriques alternatifs pour brûler les tissus tumoraux, est utilisée depuis la fin des années 90 afin de traiter certaines tumeurs hépatiques. Elle est à présent également validée pour le poumon, le rein et l'os. À l'inverse, la cryoablation utilise les propriétés du froid pour détruire les cellules tumorales. L'électroporation suscite, elle, des espoirs en thérapie des tumeurs pancréatiques, car la technique permet d'envoyer un courant électrique qui détruit les zones tumorales sans créer d'échauffement dans les tissus voisins.

Par ailleurs, on commence à traiter certains cancers du foie par radioembolisation percutanée, c'est-à-dire par administration de substances radiothérapeutiques au contact direct de la tumeur.

La production d'images

À mesure que les indications diagnostiques et thérapeutiques de l'imagerie interventionnelle se développent, les systèmes de guidage et de

contrôle par l'image qui lui sont nécessaires se perfectionnent. Ainsi, après l'angiographie, c'est le scanner, l'échographie et plus récemment l'IRM qui sont de plus en plus souvent mis à contribution pour aider au pilotage et à la planification du geste. De fait, au début des années 2000, l'IRM pénètre dans certains blocs opératoires hospitaliers. En France, le premier IRM peropératoire, à champ ouvert et dédié à la neurologie, est installé au CHRU de Lille en 2014. Il permet aux chirurgiens de tenir compte, en temps réel, de la modification du cerveau induite par l'ouverture du crâne. Cette technologie « permet d'optimiser le geste chirurgical dans l'exérèse de certaines tumeurs cérébrales », ajoute dans un communiqué le CHU de Poitiers qui, pour la première fois en France, a réalisé en 2017 une intervention faisant appel à l'IRM à 3 teslas peropératoire.

Il n'y a pas de restriction à ce que l'IRM soit utilisée dans d'autres disciplines que la neurologie. Et de fait, « de plus en plus de traitements sont réalisés sous contrôle de l'IRM, comme les ablations tumorales

Essor des salles dites multimodales

Essor de la réalité augmentée dans les blocs opératoires



Chiffre clé

Dans le cadre du traitement du cancer de la prostate par ultrasons focalisés de haute intensité, un faisceau d'ultrasons est émis sous forme d'impulsions (ou tirs) qui durent 5 secondes. Chacune d'elles détruit sélectivement une zone de tissu de 22 millimètres de long et de 2 millimètres de diamètre. Environ 300 à 400 tirs successifs sont nécessaires pour traiter dans sa totalité une prostate de volume moyen.

Source : Association française d'urologie (AFU).

300

tirs

et la cryothérapie », pointe le Pr Afshin Gangi, chef du pôle d'imagerie du CHU de Strasbourg. « Le guidage sous IRM est intéressant car il ne produit aucune irradiation », justifie le Pr Vincent Vidal. « En revanche, il impose de n'utiliser absolument aucun matériel ferromagnétique, pas même une aiguille métallique. » Les techniques récentes de fusion d'images permettent de s'abstraire de cette contrainte en calquant les vues IRM de la zone cible obtenues en amont sur celles aux rayons X de l'intervention en cours.

Ultrasons focalisés

Entre la fin des années 90 et le début des années 2000 est également apparue une nouvelle génération de machines couplant l'utilisation des ultrasons focalisés à haute intensité (HIFU en anglais) à un système de guidage par IRM ou échographie. Le principe de base, connu depuis les années 40, est simple : comme les rayons du soleil passant au travers d'une loupe, un faisceau d'ultrasons de haute intensité, focalisé sur une zone donnée, peut la détruire en tout ou partie par nécrose sous l'effet de la chaleur générée (jusqu'à 85°C).

Guidée par l'imagerie, cette technique permet une thermoablation transcutanée non invasive précise et contrôlée en temps réel, en cas de tumeur maligne ou bénigne de la prostate, de tumeur bénigne du sein et de la thyroïde, de fibromes utérins ou encore de métastases osseuses. Cette technique alternative à la chirurgie, aussi appelée échothérapie, >>>



Le handicap des patients pris en compte

« Initialement, les tables de radiologie ne servaient qu'aux examens diagnostics, qui ne prenaient que quelques minutes », pointe le Pr Afshin Gangi, chef du pôle d'imagerie du CHU de Strasbourg. « Désormais, elles font aussi office de tables opératoires au sein des salles multimodales. Les patients sont donc amenés à rester immobiles pendant, parfois, plusieurs heures. » L'ergonomie de ces tables devait donc évoluer. Mieux adaptées aux fortes corpulences et handicaps des patients, elles sont aussi, de plus en plus, équipées de matelas et d'appuie-bras pour être plus confortables.

»»» pourrait bientôt investir les établissements de soins pour venir à bout des métastases hépatiques ou des tumeurs cérébrales profondes.

« Des recherches cliniques prometteuses sont également en cours pour développer la méthode des HIFU au traitement du glaucome mais aussi du tremblement essentiel, de la maladie de Parkinson ou encore des douleurs centrales », ajoute Jean-Yves Chapelon, qui dirige à l'Inserm à Lyon le laboratoire Thérapies et applications ultrasonores. D'autres sont menées pour le traitement des affections veineuses (varices et ulcères), actuellement traitées par radiofréquence et laser.

Par ailleurs, certaines procédures se robotisent, notamment pour le traitement du cancer de la prostate (depuis 2014). « Une sonde est introduite dans l'urètre du patient par un urologue, émet des ultrasons ultra-ciblés de haute intensité et, à travers les parois de l'urètre, détruit les zones de la prostate atteintes par le cancer de manière tout à fait automatisée et robotisée. Le temps d'ablation est d'environ 40 minutes », détaille le Pr Gangi, qui ajoute que cette procédure se fait sous contrôle IRM en présence d'un radiologue.

Essor des salles multimodales

Les interventions au bloc opératoire sont de plus en plus « multidisciplinaires et multimodales au profit des patients », explique le Pr Gangi. En effet, le « travail à quatre mains » entre les radiologues et les cardiologues, chirurgiens vasculaires, gastro-entérologues, urologues ou encore les neurologues se développe, pour cathétériser des vaisseaux de manière très sélective, détruire une tumeur en injectant à l'intérieur un traitement par chimiothérapie ou en y plaçant une électrode et ce, directement à travers la peau jusqu'aux parties les plus profondes de l'abdomen, poser un stent, remettre en fonctionnement des organes vitaux tel que le foie, etc.

En outre, depuis le début des années 2010, les salles d'imagerie dites hybrides ou multimodales, c'est-à-dire associant plusieurs modalités d'imagerie, se développent dans les établissements de soins. En janvier 2018, le CHU de Strasbourg a ainsi inauguré une salle multimodale 4D, associant « une salle d'angiographie, un scanner 4D multibarrette mobile sur rail pouvant réaliser des scanners volumiques du corps entier en 0,3 seconde, un écran large et un échographe », détaille le Pr Gangi.

Les avantages sont nombreux : « Une seule salle, une seule sédation du patient et de multiples examens et traitements réalisables en une seule fois », note-t-il tout en précisant qu'une deuxième salle de ce type devrait prochainement ouvrir ses portes au sein de son CHU. Le système d'angiographie et le scanner « sont capables de se reconnaître entre

eux et de communiquer » pour, par exemple, réaliser une fusion d'images, et peuvent être utilisés « dans le cadre d'une prise en charge multi-organes (traitement de cancers de la prostate, du rein, du poumon, du foie...) combinée », complète l'établissement de soins dans un communiqué.

Autre innovation de poids pour accompagner ces nouvelles salles, la robotisation des tables de radiologie interventionnelle : les tables peuvent se déplacer, les émetteurs et capteurs de rayons X sont disposés le long d'un bras articulé...

Voir ce que l'œil ne peut pas voir

« On parle beaucoup d'intelligence artificielle (IA) aujourd'hui, complète le Pr Gangi. C'est pour nous une aubaine. Cela nous facilitera la tâche pour calculer la taille de l'ablation à réaliser au vu du volume et de la vascularisation d'une tumeur, par exemple, mais aussi pour évaluer le nombre de sondes requises, l'intensité de l'énergie à utiliser, etc. » Autre progrès attendu : l'IA permettra de comparer, en quelques secondes, des images prises à des dates différentes pour constater l'évolution d'une pathologie ou d'un traitement. « Cela ne remplacera pas les professionnels de santé. Néanmoins, cela augmentera leur précision et leur expertise », estime le professeur.

La réalité augmentée permet depuis peu de projeter virtuellement sur le patient allongé sur la table d'opération un concentré de toutes les images radiologiques pré et per-opératoires

collectées (radio, scanner, IRM). Cette technique fournit un grand nombre de données au chirurgien doté d'un casque, afin de renforcer la qualité de son geste : épaisseur exacte des tissus, emplacement précis des organes et des structures osseuses alentour, etc. Une première mondiale a eu lieu en décembre 2017, à l'hôpital Avicenne (Seine-Saint-Denis) : la pose d'une prothèse d'épaule à l'aide d'un casque de réalité augmentée. Une autre technique consiste à projeter les images fusionnées sur un grand écran.

Depuis 2017, des appareils angiographiques couplés à un scanner ainsi qu'à quatre caméras 3D combinent la vue externe du corps du patient capturée par les caméras optiques et la vue interne acquise par radiographie afin de créer une vue 3D en réalité augmentée de l'anatomie du patient. Déjà installés en France et en Suède, ils facilitent la planification des procédures, la navigation des instruments chirurgicaux et le positionnement des implants tout en réduisant la durée des procédures. « Et ce d'autant plus qu'un système d'IA embarqué compare les images captées avec un stock d'images emmagasinées », conclut le Pr Gangi.

IMAGERIE PAR RÉSONANCE MAGNÉTIQUE (IRM)

VOIR L'EAU EST SA FORCE

Trente ans ont suffi à l'IRM pour se tailler une place de choix parmi les explorations médicales à visées diagnostique et thérapeutique. Le fait est qu'elle n'a pas son pareil pour donner à voir l'anatomie et le fonctionnement des différents organes et tissus mous, à commencer par le cerveau.



DE LA THÉORIE...

L'IRM est une modalité d'imagerie non invasive et non irradiante qui fournit des vues en deux ou trois dimensions de l'intérieur du corps. Elle permet d'explorer tous les tissus mous : le cerveau, la moelle, les muscles, les organes digestifs et reproducteurs, etc. Elle permet d'en connaître la structure anatomique (on parle alors d'IRM anatomique) mais aussi d'en suivre le fonctionnement et le métabolisme (dans le cas de l'IRM fonctionnelle). Elle est très utilisée en neurologie pour localiser certaines malformations du cerveau mais également pour repérer des anomalies du cartilage, des

muscles ou du cœur et pour le diagnostic des tumeurs cancéreuses. L'IRM fonctionnelle fournit des informations sur l'activité cérébrale, musculaire ou cardiaque, avec une grande précision anatomique et temporelle.

À LA PRATIQUE

L'IRM consiste à plonger le patient dans un champ magnétique puissant généré par un aimant, le plus souvent placé dans un « tunnel » de 1,60 à 2 mètres de long et de 70 centimètres de large. Il existe également aujourd'hui des modèles « ouverts ». En présence de ce champ, les noyaux

L'IRM consiste à plonger le patient dans un champ magnétique puissant généré par un aimant.

des atomes d'hydrogène composant le corps humain (celui-ci est en effet essentiellement constitué d'eau) réagissent comme des petites boussoles : ils s'alignent dans l'axe du champ magnétique. Des ondes radioélectriques sont alors envoyées durant une courte période, entraînant une rotation des noyaux. Lorsqu'elles cessent, les noyaux reviennent à leur état initial et libèrent un signal (onde électromagnétique). C'est ce signal, capté par des antennes, qui est traduit en intensité et localisé dans l'espace, ce qui permet de construire l'image.

Ainsi, toutes les parties du corps riches en eau ou en graisse sont visibles, soit la grande majorité des tissus mous. À l'inverse, on distingue mal les os et les poumons même si les techniques progressent aussi pour ces types d'exploration. Plus le signal recueilli est intense, plus le point sur l'image est blanc. L'intensité dépend de la nature du tissu, si bien que l'IRM permet de les distinguer. Des produits de contraste paramagnétiques peuvent être administrés au patient pour augmenter la qualité de l'image.

L'IRM fonctionnelle permet de détecter la modification des propriétés magnétiques de l'hémoglobine

lorsque celle-ci subit une oxygénation. On peut alors visualiser les zones les plus consommatrices d'oxygène, c'est-à-dire les plus actives. Des méthodes dites d'IRM de diffusion permettent quant à elles de visualiser les mouvements de l'eau extracellulaire qui est ralentie dans les tissus à forte densité cellulaire (certaines tumeurs, par exemple). La perfusion des tissus, c'est-à-dire l'apport vasculaire, peut aussi être quantifiée.

UNE HISTOIRE D'INNOVATION

L'histoire de l'IRM démarre après la Seconde Guerre mondiale, avec la description du phénomène de la résonance magnétique nucléaire (RMN). Les premières images datent quant à elles de 1973. Les chercheurs s'inspirent des méthodes de reconstruction d'images de la tomodensitométrie (scanner) pour parvenir à visualiser en IRM une coupe en deux dimensions... d'un poivron. La technique évolue alors au rythme des progrès de l'électronique et de l'informatique.

Dès 1977, on sait produire par IRM l'image d'un corps humain vivant. « *Dans les vingt ans* »>>>

Double prix Nobel

L'invention de l'imagerie par résonance magnétique a valu à Paul Lauterbur et Peter Mansfield de recevoir le prix Nobel de médecine en 2003. Le premier, chimiste américain, aurait eu l'idée de l'IRM dans un wagon-restaurant. Il aurait griffonné sa machine sur une serviette de table. Le second, britannique, imprimeur avant de devenir physicien, a montré comment les signaux radio de l'IRM pouvaient être analysés mathématiquement et convertis en une image exploitable. C'est également lui qui a jeté les bases de l'IRM fonctionnelle. Rien de cela n'aurait été possible sans le développement préalable de la résonance magnétique nucléaire (RMN) . Des travaux pour lesquels deux physiciens, Felix Bloch et Edward Purcell, ont eux aussi été récompensés par le prix Nobel cinquante ans plus tôt, en 1952.

1975

Premières images d'IRM de tissus humains

1982

Installation des premiers appareils d'IRM en France

1990

Première IRM à 3 teslas en France

1992

Premières images du cerveau en fonctionnement

2007

Première IRM à 7 teslas en France

« L'IRM est indispensable pour prendre en charge les cancers gynécologiques »

D^r Sophie Taïeb, radiologue au Centre Oscar Lambret (Lille)

« En cancérologie gynécologique, l'IRM a de nombreuses indications. On s'en sert pour faire la différence entre des tumeurs de l'ovaire plus ou moins agressives. Pour un cancer de l'utérus, l'examen permet de déterminer la taille de la lésion et donc d'orienter vers tel ou tel traitement. Face à un cancer de la prostate, on s'appuie sur l'IRM pour décider de la meilleure option thérapeutique, entre la chirurgie ou la radiothérapie. Par la suite, l'IRM est utilisée pour évaluer l'efficacité d'un traitement par chimiothérapie. Mais passer un examen d'IRM n'a rien d'agréable : la machine fait beaucoup de bruit, il y fait chaud et on doit rester immobile. Heureusement, grâce à l'augmentation de la puissance informatique des machines, le patient y reste moins longtemps qu'auparavant. »

«>>> qui ont suivi l'arrivée de l'IRM en France, les progrès ont d'abord concerné la qualité des images produites », raconte Isabelle Magnin, directrice d'un laboratoire international associé franco-chinois, dédié au traitement et à l'analyse d'images médicales au Harbin Institute of Technology, en Chine. Grâce à l'IRM, l'exploration du système nerveux s'accélère et les connaissances sur l'anatomie du cerveau s'accumulent. La technique devient progressivement la référence pour produire des images du système nerveux central qui distinguent la substance blanche, la substance grise et le liquide céphalo-rachidien. « La plupart des avancées technologiques de l'IRM ont d'abord bénéficié à la neurologie avant de basculer vers le corps entier », note le D^r Sophie Taïeb, radiologue au Centre Oscar Lambret (Lille).

Des aimants de plus en plus puissants

La puissance des IRM augmente considérablement au fil des années. Au début des années 80, les machines délivrent un champ magnétique

d'une intensité de 0,5 à 1 tesla. Trente ans plus tard, la grande majorité des IRM ont une puissance de 1,5 ou 3 teslas. « L'augmentation de la puissance a permis l'essor de l'IRM fonctionnelle en neurologie », explique le D^r Taïeb. Ces technologies ont un champ magnétique plus puissant et un signal plus important, permettant ainsi de recueillir plus de signal et par conséquent davantage d'informations sur les organes et les tissus. Résolution de l'image accrue, coupes plus fines et meilleur contraste entre les différentes structures anatomiques : tels sont quelques-uns de ses principaux atouts qui en font un outil de choix pour caractériser le comportement d'un organe au travers de séquences fonctionnelles, métaboliques, de diffusion ou de perfusion (*lire l'encadré en colonne de gauche*). Par ailleurs, comme l'acquisition d'images est moins longue, la durée de l'examen pour le patient est raccourcie, de même que le délai d'attente pour bénéficier d'un examen.

« Avec une IRM à 3 teslas, il faut 30 minutes pour faire une séquence fonctionnelle, contre 45 avec un appareil à 1,5 tesla », témoigne le D^r Taïeb.

Fin des années
2000

Premières machines
à ouverture large
(70 centimètres)

2010

Introduction de séquences
d'acquisition silencieuses

Depuis les années
2010

Essor des modalités hybrides
d'imagerie associant IRM
et IRM per-opératoire

2017

Première IRM à 7 teslas clinique
pour l'imagerie neurologique
et ostéo-articulaire



« En injectant un produit de contraste et à partir de coupes très fines, de l'ordre de 0,6 millimètre, il devient possible d'étudier la cellularité des tissus. »

L'IRM à 3 teslas est aujourd'hui devenue « le champ magnétique de référence en neuro-imagerie », complète le Pr Thomas Tourdias, neuro-radiologue au sein du service de radiologie et de neuro-imagerie diagnostique et thérapeutique du CHU de Bordeaux.

L'IRM comme outil de recherche

Des IRM de 7 et 11,7 teslas existent, pour l'heure utilisés à des fins de recherche dans le monde. À Saclay, par exemple, le centre de neuro-imagerie NeuroSpin est en passe d'installer un appareil de 11,7 teslas pour mieux comprendre le fonctionnement du cerveau ainsi que les pathologies neurologiques. Auront-ils un jour d'autres applications ? « En octobre 2017, un appareil de 7 teslas a obtenu, aux États-Unis, l'approbation de l'Agence américaine des produits alimentaires et médicamenteux (FDA) pour être utilisés à des >>>

960
appareils d'IRM

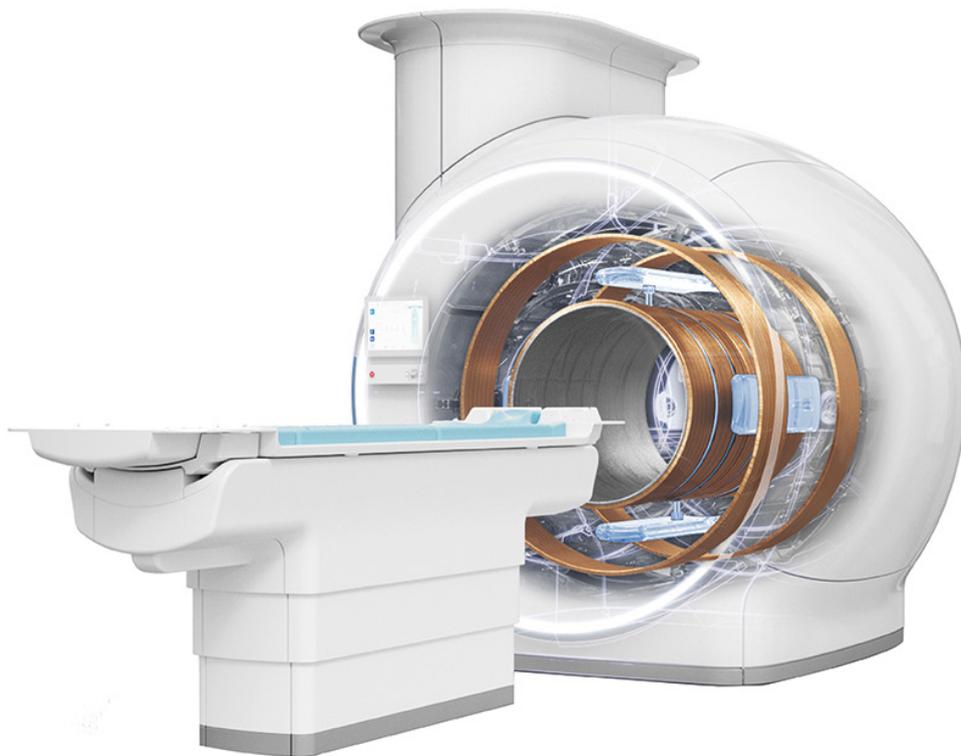
Chiffre clé

C'est le nombre d'appareils d'IRM en service en France au 1^{er} janvier 2018 (hors équipements de recherche, vétérinaires et militaires), soit 14,8 machines par million d'habitants.

Le délai d'attente est de 32 jours en moyenne pour bénéficier d'une IRM dans le pays (en cancérologie).

Le Plan cancer 2014-2019 a fixé pour ambition de ramener ce délai sous la barre des 20 jours.

Source : étude Cemka 2018 pour le SNITEM.



»»» fins cliniques, notamment en imagerie neurologique et ostéo-articulaire », note le Pr Tourdias. Les perspectives sont donc très intéressantes. Pour autant, la puissance du champ magnétique de ces appareils peut causer des vertiges chez certaines personnes.

L'intelligence artificielle, en plein essor en imagerie, s'invite en effet dans le domaine de l'IRM, y compris « au service du traitement de l'image », détaille le Pr Tourdias. Des algorithmes se développent, par exemple, pour réduire voire supprimer le « bruit » et améliorer la qualité du rendu visuel. Par la suite, « les outils d'aide au diagnostic vont clairement se développer », analyse le Pr Tourdias, qui lui-même mène des travaux de recherche sur la détection et le contourage automatique des AVC. « Il est en effet important de détecter au plus tôt l'AVC et d'en déterminer le volume, pour pouvoir le traiter au mieux ensuite », pointe-t-il.

L'IRM mammaire, « outil supplémentaire »

« L'IRM du sein ne remplace pas la mammographie ni l'échographie mammaire » et « elle ne constitue pas un examen systématique du diagnostic du cancer du sein », rappelle l'Institut national du cancer (INCa). Celui-ci détaille, sur son site www.e-cancer.fr, certains cas dans lesquels elle peut toutefois être utile : « pour faire la différence entre une anomalie bénigne et une anomalie cancéreuse dans le cadre du dépistage des femmes à haut risque de cancer du sein » ; « lorsque l'imagerie standard (mammographie ou échographie) ne permet pas de conclure avec certitude à l'absence de malignité » ; « pour vérifier l'état d'implants mammaires, en particulier si on croit qu'il y a eu rupture » ; ou encore, « pour guider un prélèvement par biopsie ». Cet examen présente notamment l'avantage, pour le suivi et le dépistage des femmes à risque, d'être non irradiant.

Un meilleur confort des patients

Les fabricants ont par ailleurs mis au point, ces dix dernières années, des nouveaux modèles pour améliorer le confort des patients. Les modèles classiques de 60 centimètres de diamètre ont, progressivement, été remplacés par des équipements plus spacieux de 70 centimètres de diamètre. « *Les patients se sentent généralement moins confinés et moins anxieux* », souligne le Pr Tourdias, qui rappelle que les examens d'IRM peuvent être « *angoissants* » : les patients doivent rester immobiles pendant un certain temps dans un espace qui peut paraître étroit et bruyant. Les industriels développent d'ailleurs des appareils plus silencieux mais aussi « *à champ ouvert* », c'est-à-dire sans tunnel, utiles pour des patients appareillés, en surpoids, anxieux ou encore claustrophobes. Cer-



tains radiologues, de leur côté, proposent un environnement sonore, visuel (avec projection de vidéos) et lumineux adapté créant une atmosphère relaxante avant, pendant et après l'examen.

Les constructeurs œuvrent également pour réduire la durée des examens, notamment en accélérant l'acquisition des images, désormais « *multicoupes* », précise le Pr Tourdias. Cette technique est associée à celle du *compress sensing*®, qui vise l'acquisition non pas de la totalité des données mais uniquement des données nécessaires. Des algorithmes itératifs® de reconstruction de l'image, faisant appel à de l'intelligence artificielle, reconstituent ensuite les images dans leur intégralité. Ce procédé permet d'accélérer jusqu'à dix fois le processus d'acquisition des images. « *Ce gain de temps peut s'avérer précieux en situation d'urgence, par exemple en cas d'AVC* », ajoute le Pr Tourdias.

Il est à noter que l'amélioration de la performance des antennes a aussi permis de réduire le temps des examens, en permettant à celles-ci de capter plus rapidement le signal. « *Certaines de ces antennes sont aujourd'hui plus souples pour explorer des régions autour de la tête, des cervicales ou d'une épaule* », complète le neuroradiologue.

Enfin, ont également été développées des machines plus petites dédiées aux membres, qui permettent de produire des images d'un patient en position assise, ce qui développe les usages ostéo-articulaires. Elles sont toutefois aujourd'hui, pour la majeure partie, en phase d'être remplacées par des machines polyvalentes. >>>

Quid de l'« IRM bas champ » ?

L'IRM dite « bas champ », dont le champ magnétique émis est inférieur à 0,5 tesla, est complémentaire de l'IRM haut champ. Apparue dans les années 70, elle s'est déployée dans les années 80-90 et est aujourd'hui répandue au Japon, aux États-Unis et en Europe (Allemagne, Angleterre, Italie...), mais encore peu en France (sauf en médecine vétérinaire). Elle est principalement utilisée pour les explorations ostéo-articulaires et neurologiques. Certains équipements sont dédiés à l'IRM bas champ, d'autres associent les deux modalités d'IRM, haut champ et bas champ. Ils ont bénéficié de l'amélioration des systèmes de traitement du signal et de la réduction des perturbations (électromagnétiques, vibratoires, etc.) dudit signal. Des logiciels permettent ainsi, par exemple, de réduire le phénomène de mouvements sur les images, notamment les artefacts® respiratoires.

IRM de diffusion versus IRM de perfusion

Deux techniques d'IRM, que l'on rattache par extension à l'IRM fonctionnelle, complètent l'arsenal diagnostique et thérapeutique des radiologues et des cliniciens. Elles apportent toutes deux des informations invisibles à l'IRM conventionnelle et permettent de détecter des anomalies de type accident vasculaire, lymphome, abcès, kyste, tumeur... Il s'agit de :

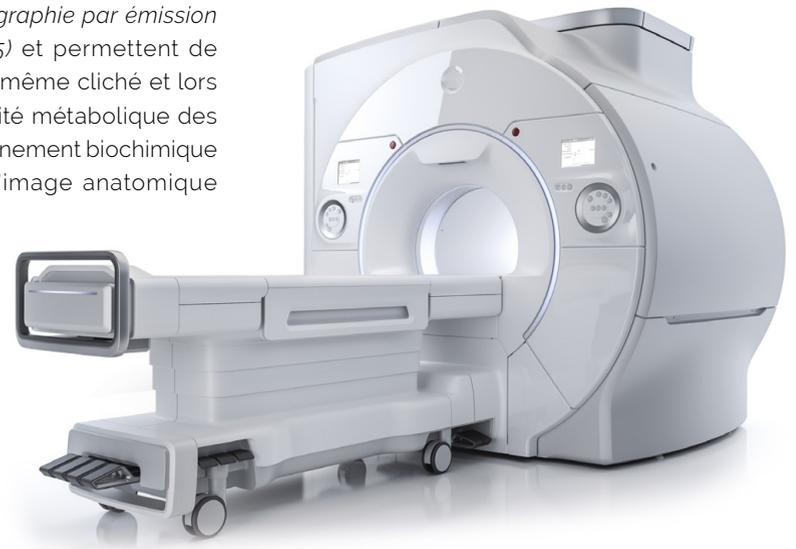
- **L'IRM de diffusion**, qui permet d'évaluer le mouvement des molécules d'eau dans l'organisme, sachant que celui-ci peut être modifié en cas d'anomalie ;
- **L'IRM de perfusion**, qui permet de visualiser le transit, dans l'organisme, d'un « traceur » : soit un agent de contraste injecté par intraveineuse (le gadolinium® en IRM, qui remplit le même rôle que l'iode en tomodynamométrie), soit l'eau du sang artériel préalablement marquée électromagnétiquement.

Du diagnostic au soin

Des solutions ont aussi été apportées pour améliorer la fiabilité et la reproductibilité des images, indépendamment des facteurs liés à l'opérateur (radiologue et manipulateur) ou au patient et à ses fonctions physiologiques et morphologiques, pour améliorer le suivi de certaines anomalies (tumeur...). Aujourd'hui, pour des examens IRM du cœur ou du thorax, les appareils les plus récents sont capables de prendre automatiquement en compte la rapidité de la respiration des patients.

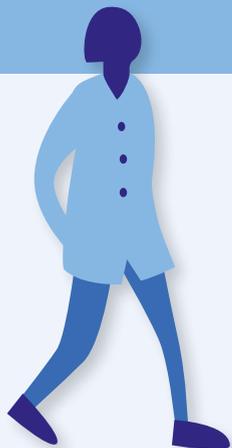
Autre preuve que l'IRM dépasse le simple champ du diagnostic : l'apparition, ces dernières années, de modalités d'imagerie dites « hybrides ». Certaines machines couplent un appareil d'IRM à un tomographe par émission de positons (*lire sur le sujet le chapitre sur la tomographie par émission de positons en pages 22-25*) et permettent de mettre en évidence, sur un même cliché et lors d'un examen unique, l'activité métabolique des organes ainsi que le fonctionnement biochimique des tissus superposés à l'image anatomique

donnée par l'IRM. Associée à l'utilisation d'ultrasons de haute intensité et focalisés, l'IRM contribue au traitement du fibrome utérin, à l'ablation de certaines tumeurs osseuses ou à la destruction des noyaux gris dans le cadre du traitement du tremblement essentiel, une maladie neurologique. Elle permet en effet de piloter les ultrasons mais aussi de contrôler l'élévation de température, y compris dans des zones jusqu'alors inaccessibles (*lire pages 22-25*). En parallèle, au début des années 2000, elle a également fait son entrée dans le bloc opératoire de centres hospitaliers afin de guider certaines interventions chirurgicales... Une révolution est en marche !



« Une prise en charge plus rapide et plus fluide »

LE REGARD DU PATIENT



Depuis près de vingt ans, Danielle Troullieur, chargée de relations presse, est atteinte de rhumatisme inflammatoire chronique qui touche certains de ses tissus articulaires et osseux. L'imagerie médicale est cruciale pour suivre le développement de sa pathologie évolutive source d'inflammations et, parfois, d'infections. Elle témoigne de l'évolution de sa prise en charge au gré de l'innovation dans ce domaine.

« Je suis atteinte d'une pathologie articulaire lourde. Diagnostiquée en 2000, elle a une double entrée : inflammatoire et infectieuse. Je souffre en effet d'une polyarthrite rhumatoïde, d'une spondylarthrite ankylosante et, certains sites s'étant infectés, d'ostéites. J'ai donc besoin d'exams d'imagerie très régulièrement pour contrôler leur évolution : radios, IRM, TEP Scan, scintigraphies... Au fil des années, j'ai été particulièrement marquée par la rapidité de ces examens qui s'est considérablement accrue. Désormais, pour un IRM du rachis, par exemple, je passe 20 minutes au lieu de 45 sur la table d'examen. Quant à l'examen au scanner, il me semble éclair aujourd'hui puisqu'il ne dure plus que

quelques minutes. Depuis deux ans, je bénéficie également de l'IRM corps entier. C'est assez bluffant. Auparavant, il me fallait un IRM pour chaque site articulaire pathologique à examiner, c'est-à-dire, dans mon cas, un IRM du dos, un de l'épaule, un du poignet et un de la clavicule. Cela impliquait quatre examens, réalisés en plusieurs fois, ce qui était toujours un peu contraignant, surtout au vu de ma pathologie et des délais pour obtenir des rendez-vous. Aujourd'hui, une seule acquisition d'images suffit pour un diagnostic global. Cela a transformé ma prise en charge et mon traitement. En outre, l'examen, qui ne nécessite plus d'injection de contraste, est plus agréable.

Enfin, j'ai constaté une hyperspécialisation des appareils et des praticiens, qui permettent, en cas de maladie articulaire, de repérer de manière certaine et précise l'ensemble des sites osseux ou articulaires atteints. C'est assez rassurant, d'autant plus qu'il y a de plus en plus de facilités, pour moi comme pour mes professionnels de santé, à accéder aux résultats des examens. Je n'ai plus à me déplacer pour aller les chercher : tous mes clichés sont accessibles via un serveur sécurisé auquel mon rhumatologue, mon chirurgien orthopédique ou mon infectiologue peuvent se connecter. Ce sont eux qui m'appellent après avoir interprété les clichés déposés sur ce serveur. Tout me semble plus rapide et plus fluide. »

A

Absorptiométrie biphotonique à rayons X (ou ostéodensitométrie)

Modalité d'imagerie médicale permettant de mesurer la densité de l'os et, notamment, la densité minérale osseuse surfacique (exprimée en g/cm²).

Accident vasculaire cérébral (ou AVC)

Perte soudaine de la fonction du cerveau, provoquée par un arrêt brutal de la circulation sanguine à l'intérieur du cerveau.

Acquisition comprimée (ou *Compressed sensing*)

Technique d'acquisition et de compression simultanée de données visant à acquérir uniquement les données nécessaires pour obtenir, après reconstruction itérative, des images d'organes en mouvement, notamment en imagerie cardiaque et abdominale. Elle permet d'accélérer largement le processus d'acquisition.

Algorithme itératif

Algorithme basé sur une méthode de calculs répétitifs, utilisé pour reconstruire des images 2D et 3D dans certaines techniques d'imagerie.

Amplificateur de luminance (ou de brillance)

Appareil permettant de transformer une image optique en une image électronique. Il est utilisé en radioscopie pour augmenter la luminosité et la précision d'une image recueillie directement sur un écran fluorescent, puis pour la projeter sur un écran de télévision. L'image est obtenue par un faisceau de rayons X de faible intensité, ce qui expose le patient à une irradiation légère. L'image peut être observée, photographiée et transmise à distance.

Anévrisme cérébral

Cavité formée par la dilatation des parois d'une artère intracrânienne et contenant du sang. Généralement, l'anévrisme cérébral non rompu est découvert fortuitement lors d'une investigation radiologique car il n'est associé à aucun symptôme. La rupture d'un anévrisme cérébral produit une hémorragie plus ou moins importante dont les conséquences peuvent être dramatiques.

Angioplastie

Procédé destiné à réparer ou à remodeler un vaisseau par suture, désobstruction, élargissement à l'aide d'une pièce, dilatation par sonde à ballonnet, etc. L'angioplastie transluminale percutanée consiste à dilater une artère rétrécie par une plaque d'athérome (cholestérol) ou une malformation.

Sous contrôle radioscopique, une sonde à ballonnet est introduite au travers de la peau dans l'artère et poussée jusqu'au lieu constaté du rétrécissement. Le ballonnet est alors gonflé de manière à écraser la plaque d'athérome puis à rétablir un calibre artériel suffisant pour permettre la bonne circulation du sang.

Artefact

Phénomène parasite faussant le tracé d'un appareil enregistreur, dû à la technique utilisée ou à l'appareil lui-même, et qui risque de perturber l'interprétation des données.

Artère poplitée

Artère qui fait suite à l'artère fémorale, située derrière le genou.

Atélectasie

Affaissement (rétraction) du tissu pulmonaire avec perte de volume.

C

Caméra TEP

Caméra utilisée pour réaliser une tomographie par émission de positons (dénommée TEP Scan ou PET Scan), un examen d'imagerie médicale fonctionnelle qui permet de mesurer en trois dimensions l'activité métabolique ou moléculaire des tissus. Elle permet de détecter les rayonnements d'un traceur faiblement radioactif injecté au patient (par exemple, le fluor 18).

Capteur plan

Capteur de rayons X à surface plane permettant d'obtenir une image radiologique numérique lors de la prise d'une radiographie.

Chimioembolisation

Mode de traitement qui associe l'embolisation (obstruction thérapeutique d'une zone inaccessible par la chirurgie) et la chimiothérapie (usage de certaines substances chimiques pour traiter une maladie). Préconisé pour certaines tumeurs malignes, il consiste à déposer localement par voie artérielle des micro-capsules contenant le médicament anticancéreux.

Choline

Nutriments parfois marqué au fluor 18 pour être utilisés comme radiotraceurs lors d'une tomographie par émission de positons (TEP). La choline fait partie de la grande famille des vitamines B.

Cryoablation

Technique mini-invasive de destruction d'une tumeur fondée sur l'alternance de cycles rapides de congélation et réchauffement entraînant la nécrose des tissus. Le refroidissement est obtenu par la circulation d'un gaz, l'argon, dans une crysonde placée au contact de la tumeur, entraînant la formation de glace dans le tissu.

Cyclotron

Machine cylindrique dans laquelle règne le vide et qui sert à accélérer des particules chargées (protons, ions) sous l'action combinée d'un champ électrique et d'un champ magnétique. Les particules atteignent ainsi des vitesses extrêmes. À leur sortie de l'accélérateur, elles sont projetées sur une cible, ce qui produit des atomes radioactifs utilisés ensuite en médecine nucléaire.

E**Écho-doppler**

Combinaison d'un examen doppler et d'une échographie, qui ajoute aux informations sur la circulation sanguine fournies par le doppler des éléments anatomiques relatifs aux vaisseaux ou au cœur.

Échographie

Technique d'imagerie médicale fondée sur l'enregistrement des échos produits par les ultrasons lors de leur passage à travers différents milieux et structures de l'organisme.

Électroporation

Méthode de destruction des cellules cancéreuses qui consiste à augmenter la perméabilité de la membrane cellulaire sous l'effet d'impulsions électriques courtes et intenses.

Exérèse

Intervention chirurgicale consistant à retirer de l'organisme un élément qui lui est nuisible ou inutile (organe, tumeur, corps étranger, etc.).

F**Fibrose kystique (ou mucoviscidose)**

Maladie génétique qui touche les voies respiratoires et digestives.

G**Gadolinium**

Composant chimique de numéro atomique 64 et de symbole Gd, utilisé comme agent de contraste en IRM.

I**Imagerie par résonance magnétique (IRM)**

Technique d'imagerie médicale utilisant les propriétés de résonance magnétique nucléaire (RMN) des protons, en particulier ceux des molécules d'eau, du corps humain. Elle fournit des images en trois dimensions et en coupe d'une très grande précision anatomique.

L**Lymphome**

Tumeur composée de tissu lymphoïde typique, développée soit dans les organes contenant déjà ce tissu, comme la rate ou les ganglions, soit dans ceux qui n'en contiennent pas. Terme généralement réservé aux tumeurs malignes comme les maladies de Hodgkin, de Burkitt et les leucémies lymphoïdes.

M**Mammographie**

Modalité de l'imagerie médicale mettant en œuvre

la radiographie des seins, dans le but de détecter d'éventuelles anomalies au niveau des tissus.

O**Ondes de cisaillement**

Ondes dites « transversales ». À leur passage, les mouvements du sol s'effectuent perpendiculairement au sens de propagation de l'onde. Ces ondes ne se propagent pas dans les milieux liquides.

Ondes de compression

Ondes dites « longitudinales ». Le déplacement de la matière qui accompagne leur passage se fait par dilatation et compression successives, parallèlement à leur sens de propagation.

P**Phlébite**

Trouble cardiovasculaire correspondant à la formation d'un caillot de sang dans une veine, empêchant le retour du sang vers le cœur et les poumons.

Pneumothorax

Présence anormale d'air dans la cavité pleurale, cet espace situé entre la double membrane qui constitue la plèvre et qui enveloppe les poumons.

R**Radiodermite**

Ensemble des réactions provoquées par une irradiation sur la peau.

Radiotracteur (ou traceur radioactif)

Molécule marquée avec un atome radioactif et utilisée pour suivre, par détection externe, le fonctionnement normal ou pathologique d'un organe. Le >>>

>>> radiotraceur présente les mêmes propriétés physico-chimiques que son homologue non radioactif, mais a la particularité d'émettre un rayonnement, ce qui permet de repérer sa position dans l'organisme.

Résonance magnétique nucléaire (RMN)

Propriété de certains noyaux atomiques placés dans un champ magnétique. Soumis à un rayonnement électromagnétique (radiofréquence), ils peuvent alors absorber l'énergie dudit rayonnement puis la relâcher. L'énergie mise en jeu lors de ce phénomène de résonance correspond à une fréquence très précise, dépendant de la force du champ magnétique et d'autres facteurs moléculaires. La RMN est donc extrêmement utile pour la détermination de la structure des molécules.

Rubidium 82

Isotope radioactif du rubidium. Il est utilisé en tomographie par émission de positons (PET/TEP) pour visualiser l'activité cardiaque.

S

Scanner multibarrettes (ou multidétecteur)

Machine de tomodensitométrie équipée de plusieurs rangées de détecteurs (barrettes) servant à mesurer l'intensité des rayons X après qu'ils aient été en partie absorbés lors de leur passage à travers l'organisme.

Scanner spiralé (ou hélicoïdal)

Machine de tomodensitométrie (scanner) émettant des rayons X en continu pendant l'examen, la table d'examen sur laquelle est allongé le patient se déplaçant à l'intérieur de l'anneau de l'appareil. Permet d'obtenir des images multicoupes.

Scintigraphie

Technique d'imagerie médicale relevant de la médecine nucléaire et fondée sur le repérage dans l'organisme d'un atome radioactif qui y a été introduit pour étudier un phénomène physiologique ou pathologique, le suivi de son cheminement et de sa fixation. Les radiations émises par l'atome radioactif sont enregistrées par un compteur à scintillation placé en face de la zone à explorer. On obtient ainsi la silhouette et la carte de l'organe ou de la région qui a fixé le produit radioactif.

Sclérose latérale amyotrophique (SLA)

Maladie neurodégénérative caractérisée par une paralysie musculaire progressive, résultant d'une destruction des neurones moteurs. Elle est aussi connue sous le nom de maladie de Charcot – du nom du médecin qui l'a décrite au XIX^e siècle.

Sténose

Rétrécissement du calibre d'un organe, d'un canal ou d'un vaisseau.

T

Tesla

Unité du système international pour l'induction magnétique, utilisée notamment pour quantifier la puissance d'un appareil IRM. Ce terme vient du nom du physicien yougoslave Nikola Tesla (1857-1943).

Thermothérapie

Catégorie de techniques médicales utilisant la variation de température pour traiter une pathologie, notamment certaines tumeurs par le froid (cryothérapie) ou par la chaleur (radiofréquences, micro-ondes, laser).

Thermoablation

Destruction de tissus malades par la chaleur (radiofréquence, laser).

Tomographie par émission de positons (TEP)

Technique d'imagerie médicale relevant de la médecine nucléaire et fondée sur la détection, par une caméra appropriée, des rayonnements associés aux positons (particules élémentaires légères de même masse que l'électron mais de charge électrique positive) émis par une substance radioactive introduite dans l'organisme. Elle permet d'obtenir des images en coupe (tomographies) des organes. En anglais, *positron emission tomography* (PET).

Traitement oncologique

Série de mesures mises en œuvre dans le but de prévenir ou de soigner un cancer.

Tremblement essentiel (maladie du)

Maladie neurologique se traduisant par des tremblements incontrôlables lorsque la personne effectue un mouvement ou lorsqu'elle maintient une posture qui n'est pas une posture de repos.

U

Ultrasons de haute intensité et focalisés

Technique thérapeutique qui utilise un faisceau d'ondes ultrasonores de haute intensité afin de détruire localement une tumeur, notamment au niveau de l'utérus ou de la prostate. Ce faisceau traverse l'organisme et chauffe les tissus visés. Les cellules, ainsi portées à haute température pendant quelques minutes, meurent.

OUVRAGES ET RAPPORTS

« *Imagerie médicale du futur* », Rapport du Pôle interministériel de prospective et d'anticipation des mutations économiques (PIPAME), octobre 2013.

P^r Guy Pallardy, Marie-Josée Pallardy, Auguste Wackenheim, « *L'histoire illustrée de la radiologie* », Éditions Dacosta, 1989.

« *La radiologie interventionnelle en France* », Fédération de radiologie interventionnelle, Société française de radiologie, 2010.

Jacques Delamare et al., « *Dictionnaire illustré des termes de médecine* », Éditions Maloine, 31^e édition, 2012.

Serge Kernbaum et Jean-Pierre Gréunfeld, « *Dictionnaire de médecine* », Éditions Flammarion Médecine-Sciences, 8^e édition, 2008.

DOSSIERS

« *Imagerie médicale, dossier d'information* », Institut national de la santé et de la recherche médicale (Inserm), 2011.

« *Imagerie médicale, la vie en transparence* », textes de l'exposition, Centre national de la recherche scientifique (CNRS), avril 2012.

Laure Cailloce, Fabrice Demarthon, Philippe Testard-Vaillant, « *Imagerie médicale, radiographie d'une révolution* », CNRS Le journal n°260-261, septembre-octobre 2011.

« *L'essentiel sur l'imagerie médicale* », Dossier du Commissariat à l'énergie atomique (CEA), décembre 2013.

ÉTUDES

Dietrich TJ et al., « *Comparison of radiation dose, workflow, patient comfort and financial breakeven of standard digital disappear and a novel biplanar low-dose X-ray system for upright full-length lower limb and whole spine radiography* », *Skeletal Radiol.*, 2013.

« *Les insuffisances en matière d'équipements d'imagerie médicale en France : Étude sur les délais d'attente pour un rendez-vous IRM en 2018* », Étude Cemka-Éval, réalisée pour le compte du Snitem, septembre 2018.

ARTICLES

Isabelle Bouhier, Sophie Segard, « *Échographie, les applications se diversifient* », *Journal de radiologie*, vol 85 n°7-8, 2004.

P^r Alexandre Krainik, « *L'imagerie de perfusion* », *Nouvelles techniques d'imagerie*, Haute Autorité de Santé (HAS), 18 octobre 2013.

P^r Alain Luciani et D^r Emmanuel Itti, « *L'imagerie métabolique* », *Nouvelles techniques d'imagerie*, Haute Autorité de Santé (HAS), 18 octobre 2013.

Gabriel Martin, « *Le TEP-scanner : il voit vivre nos cellules* », *La Recherche*, n°368, 2003.

Mathias Fink, « *De l'imagerie médicale au renversement temporel* », *La revue pour l'histoire du CNRS*, n°24, 2009.

RECOMMANDATIONS ET BONNES PRATIQUES

« *Exploration ostéo-articulaire des membres par IRM : intérêt diagnostique des équipements à champ modéré et des équipements dédiés* », Haute Autorité de Santé (HAS), 2012.

« *Guide du bon usage des examens d'imagerie médicale* », Société française de radiologie, 2013.

SITES INTERNET

Société française de radiologie (SFR) : www.sfrnet.org

« *Le Larousse* », encyclopédie médicale en ligne : www.larousse.fr/encyclopedie

SOCIÉTÉS SAVANTES

- Société française de radiologie (SFR).
- Société française d'imagerie cardiaque vasculaire (SFICV).
- Société française de neuroradiologie (SFNR).
- Société d'imagerie génito-urinaire (SIGU).
- Société d'imagerie musculo-squelettique (SIMS).

REMERCIEMENTS

Vincent Bellini, support Produits & Marketing DR chez Stephanix

Pr Alain Blum, chef du service d'imagerie du CHU Nancy

Pr Alain Bonafé, neuroradiologue au CHU de Montpellier

Pr Patrick Bourguet, médecin nucléaire au CLCC Rennes

Pr Valérie Bousson, radiologue à l'hôpital Lariboisière à Paris

Stephan Catheline, directeur de recherche au sein de l'Inserm à Lyon

Jean-Yves Chapelon, directeur de recherche au sein de l'Inserm à Lyon

Frédéric Dumont, chargé de missions auprès de la Direction générale chez Primax

Stéphane Dumontier, directeur marketing chez Stephanix

Pr Guy Frija, ancien chef de service d'imagerie à l'Hôpital européen Georges Pompidou, Professeur à l'Université Mac Master (Hamilton, Ontario, Canada) et à l'Université Paris Descartes (Paris-V)

Pr Afshin Gangi, chef du pôle d'imagerie du CHU de Strasbourg

Jean-Luc Gilson, directeur des services clients et des ventes IRM chez Esaote

Stéphanie Gorgeard, directrice des comptes stratégiques Ultrasons chez Canon Medical Systems

Valérie Hélin, vice-présidente en charge des affaires médicales et réglementaires chez Statlife

Philippe Juthier, directeur commercial IRM/CT chez Hitachi Medical Systems France

Anja Kleber, vice-présidente en charge du marketing, de l'accès au marché et des ventes chez Theraclion

Isabelle Magnin, directrice d'un laboratoire international associé franco-chinois, dédié au traitement et à l'analyse d'images médicales au Harbin Institute of Technology en Chine

Pr Jean-François Meder, Président de la Société française de radiologie (SFR)

D^r Jean-François Paul, radiologue au sein de l'Hôpital Américain de Paris (Neuilly-sur-Seine) et de l'Institut Mutualiste Montsouris (Paris)

Jean-Pierre Pruvo, chef du pôle imagerie, médecine nucléaire et explorations fonctionnelles au CHRU de Lille

Pr Jacques Rémy, membre du service de radiologie du CHRU de Lille

Etienne Richard, directeur des opérations chez Sonoscanner

Serge Ripart, directeur Imagerie chez Siemens Healthineers France

Elisabeth Soubelet, directrice médicale chez EOS Imaging

D^r Sophie Taïeb, radiologue au Centre Oscar Lambret à Lille

Yves Tenaglia, directeur et vice-président pour l'Europe, le Moyen-Orient et l'Afrique chez SuperSonic Imagine

Pr Thomas Tourdias, neuroradiologue du service de radiologie et de neuro-imagerie diagnostique et thérapeutique du CHU de Bordeaux

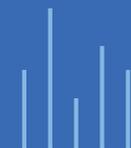
Pr Vincent Vidal, directeur du Laboratoire d'imagerie interventionnelle expérimentale à Marseille

Pr Valérie Vilgrain, chef du service de radiologie de l'hôpital Beaujon à Paris

François Vorms, directeur général de Canon Medical Systems France

AIDE A LA PRÉVENTION DES ESCARRES	ANESTHÉSIE - RÉANIMATION	APPAREIL DIGESTIF	AUDIOLOGIE	CARDIOLOGIE	CONTACTOLOGIE
DIABÈTE	DIALYSE	HANDICAP MOTEUR	IMAGERIE	INJECTION - PERFUSION	NEUROLOGIE
NUMÉRIQUE EN SANTÉ	OPHTALMOLOGIE	ORTHÈSES	ORTHOPÉDIE	PATHOLOGIES VEINO-LYMPHATIQUES	PLAIES ET CICATRISATION
RESPIRATION	ROBOTIQUE	SANTÉ BUCCO- DENTAIRE	SANTÉ DE LA FEMME	UROLOGIE	

Tous les livrets sont téléchargeables sur le site du Snitem : www.snitem.fr



Quand l'épopée de l'innovation
des dispositifs médicaux
se confond avec l'extraordinaire
histoire de l'imagerie médicale.



Snitem

92038 Paris - La Défense cedex

Tél. : 01 47 17 63 88 - Fax : 01 47 17 63 89

www.snitem.fr - info@snitem.fr

 SNITEM

 @SnitemDM

