9

Tomographie par émission de positon : les images anatomiques (IRM en gris) et fonctionnelles (TEP en couleurs). →

Imagerie nucléaire : la révolution médicale en marche

Par Ali Aït-Ikhlef, partnership manager au CEA et Bertrand Kuhnast, chef du Service hospitalier Frédéric-Joliot – CEA

En associant physique nucléaire, radiopharmacie, instrumentation et sciences du numérique, l'imagerie nucléaire permet d'observer le fonctionnement du vivant avec une précision inédite. De la production des radioisotopes jusqu'à la reconstruction des images, cette filière technologique mobilise un savoir-faire unique, auquel le CEA contribue à chaque étape.

L'imagerie médicale constitue aujourd'hui l'un des piliers de la recherche médicale et de la pratique clinique. Elle permet de diagnostiquer et de pronostiquer une maladie de manière non invasive, d'orienter les choix thérapeutiques et d'en suivre l'efficacité. Une de ses composantes en pleine croissance, l'imagerie nucléaire, est basée sur l'administration de très faibles doses de radioactivité au patient. Elle explore en temps réel les mécanismes biologiques au cœur du vivant et ouvre de nouvelles perspectives pour une médecine moléculaire plus précoce, plus ciblée et surtout personnalisée.

De la radioactivité artificielle aux applications médicales

En 1934, Irène et Frédéric Joliot-Curie mettaient en évidence la radioactivité artificielle, c'est-à-dire la possibilité de créer des atomes radioactifs inexistants à l'état naturel, découverte pour laquelle ils furent récompensés du prix Nobel de chimie. Les époux Joliot-Curie avaient déjà anticipé à cette époque le rôle déterminant des isotopes radioactifs synthétiques pour des applications en biologie et en médecine.

Après la Seconde Guerre mondiale, la construction de réacteurs nucléaires a permis la production de radioéléments artificiels pour des usages civils. Cela débouche dans les années 1950 sur l'utilisation des premiers traceurs radioactifs pour explorer le fonctionnement biologique de la thyroïde, des reins ou du système cardiovasculaire. Avec les premières gamma-caméras dans les années 1960, puis la TEP une décennie plus tard, la médecine nucléaire entre dans l'ère de l'imagerie moléculaire.

Une filière nucléaire complète au service de la santé

L'imagerie nucléaire repose sur une chaîne de valeur particulièrement riche, allant de la production des radioisotopes au traitement de données en passant par le radiomarquage d'un composé biologique, son administration au patient et l'acquisition des images par des caméras détectant les rayonnements émis.

La première étape consiste à produire les radioisotopes. Ceux-ci peuvent être obtenus par extraction dans la chaîne de décroissance d'isotopes parents provenant d'autres activités nucléaires (par exemple, extraction de l'Ac-225 à partir du Th-229) ou par irradiation de cibles dans un réacteur nucléaire ou un accélérateur de particules. Les radioisotopes ainsi générés sont utilisés pour le diagnostic (technétium-99m, fluor-18 largement utilisés ou encore carbone-11, gallium-68, cuivre-64, iode-123, etc.), mais aussi pour des applications thérapeutiques (radium-223, actinium-225, lutétium-177, plomb-212, yttrium-90, astate-211, etc.).

Ces radioisotopes sont ensuite incorporés à des molécules biologiques pour produire des radiotraceurs pour des développements précliniques, ou des radiopharmaceutiques pour les essais cliniques. Ces molécules sont conçues pour cibler un organe, un récepteur cellulaire ou un processus métabolique particulier.

Le radiopharmaceutique est ensuite administré au patient et le rayonnement émis est détecté par les gamma-caméras ou les scanners TEP. Les détecteurs extrêmement sensibles associés à des systèmes informatiques sophistiqués sont capables de reconstruire des images de distribution de la radioactivité dans les organes. Les progrès réalisés dans les détecteurs, l'informatique, la modélisation et l'intelligence artificielle permettent d'améliorer la qualité des images, de réduire les doses administrées et d'extraire des informations de plus en plus précises pour une exploitation optimale.

Des applications médicales en plein essor

L'imagerie nucléaire est aujourd'hui présente dans de nombreuses spécialités médicales. En cancérologie, elle joue un rôle central dans le diagnostic, la classification des patients et l'évaluation de la réponse aux traitements. Les examens TEP permettent notamment d'identifier des foyers tumoraux parfois invisibles avec d'autres techniques d'imagerie.

En cardiologie, elle contribue à l'étude de la perfusion du muscle cardiaque, à l'identification des zones endommagées et l'évaluation des séquelles après un infarctus, ou à déterminer la viabilité de certaines zones du cœur avant une intervention. Dans le domaine de la neurologie, l'imagerie nucléaire apporte des informations précieuses tant au niveau diagnostic, pronostic que thérapeutique notamment pour les maladies neurodégénératives comme Alzheimer ou Parkinson.

Mais l'évolution la plus marquante de ces dernières années est sans doute l'essor de la médecine « théranostique » qui associe diagnostic et thérapie par l'utilisation de molécules capables de cibler spécifiquement certaines cellules malades. Un premier isotope permet de visualiser la pathologie, tandis qu'un second fixé sur la même molécule, est utilisé pour délivrer localement une dose thérapeutique de rayonnements capable de ne détruire que les cellules malades. Cette stratégie ouvre la voie à des traitements plus ciblés et plus efficaces comme la radiothérapie interne vectorisée dans le domaine de l'oncologie.

Le CEA, un acteur clé de l'innovation en imagerie nucléaire

Dans le développement de l'imagerie nucléaire, la spécificité du CEA est de mobiliser les compétences complémentaires et translationnelles en physique nucléaire, radiopharmacie, instrumentation, biologie et sciences du numérique.

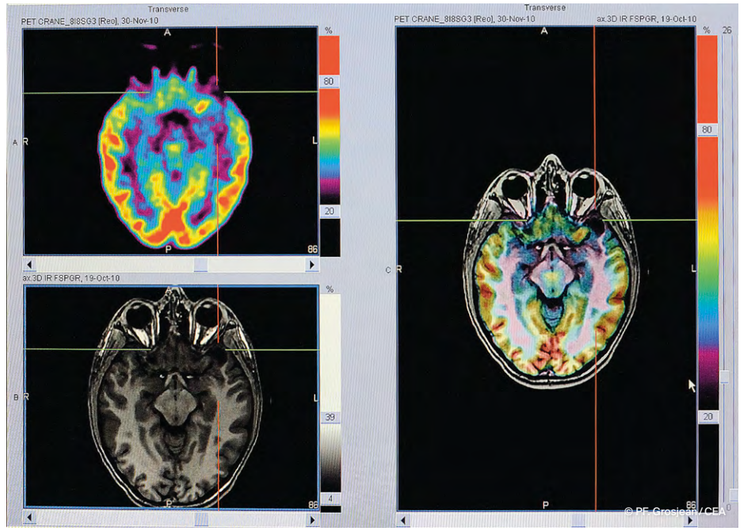
En amont de la filière, le réacteur Jules Horowitz (RJH), implanté à Cadarache et en phase finale de construction, est conçu comme un réacteur de recherche de nouvelle génération pour répondre à plusieurs missions, dont la production d'isotopes médicaux. Il contribuera ainsi à sécuriser les approvisionnements européens et à développer de nouveaux isotopes destinés aussi bien au diagnostic qu'à la médecine théranostique. Le RJH prendra la relève des réacteurs Siloé, puis Osiris pour assurer notamment entre 25 et 50 % des besoins européens du technétium-99m, utilisé dans 80 % des scintigraphies. Il représente ainsi un maillon stratégique pour l'avenir de la médecine nucléaire.

En aval de la chaîne de valeur, le Service hospitalier Frédéric-Joliot (SHFJ), service de médecine nucléaire créé en 1958 et aujourd'hui intégré au CEA-Joliot (Paris-Saclay), constitue l'un des principaux centres européens de recherche en imagerie biomédicale. Associé à l'unité mixte de recherche BioMaps, le SHFJ conçoit et évalue de nouveaux radiopharmaceutiques permettant d'explorer les mécanismes biologiques impliqués notamment dans les cancers et les maladies neurodégénératives. Il dispose non seulement d'équipements de pointe en TEP et scintigraphie mais également en imagerie multimodale (TEP-CT, TEP-IRM et TEP-ultrasons) lui permettant de faire le lien entre recherche fondamentale, développement technologique et applications cliniques.

Le CEA-Leti (Grenoble) apporte ses compétences en physique des détecteurs, en électronique et les technologies d'acquisition (deux prototypes de caméra TEP développés) et le CEA-List (Paris-Saclay et Grenoble) développe des outils numériques avancés, notamment dans les domaines de l'intelligence artificielle, participant ainsi à améliorer la sensibilité et la précision des équipements utilisés dans les hôpitaux et les centres de recherche.

Le CEA à travers l'INSTN (Institut national des sciences et techniques nucléaires), son école de formation, participe grandement à la croissance de la filière avec différents parcours diplômants en médecine nucléaire, radiopharmacie et physique médicale (135 étudiants formés par an et plus de 3 000 praticiens hospitaliers en médecine nucléaire y ayant suivi des enseignements).

Dans le développement de l'imagerie nucléaire, le CEA occupe ainsi une place de premier plan. Héritier de l'expertise française dans les sciences nucléaires, il construit l'écosystème de la filière de l'imagerie nucléaire, depuis la production des radioéléments jusqu'au développement de nouvelles applications médicales. ●



L'évolution la plus marquante de ces dernières années est sans doute l'essor de la médecine « théranostique » qui associe diagnostic et thérapie par l'utilisation de molécules capables de cibler spécifiquement certaines cellules malades

Disponible sur le site https://rgn.publications.sfen.org ou https://doi.org/10.1051/rgn/20263026