

RADIOTHÉRAPIE ADAPTATIVE

Vers une personnalisation de plus en plus poussée des traitements du cancer

La radiothérapie adaptative est une technique innovante de traitement du cancer permettant d'ajuster le plan de traitement du patient en direct en début de chaque séance, pour s'adapter aux modifications de taille, de forme et de position de la tumeur comme des organes voisins. **L'objectif de cette approche, rendue possible par l'association de l'imagerie, des logiciels de planification et des accélérateurs de particules, est de réduire l'exposition des tissus sains tout en couvrant de façon satisfaisante les volumes tumoraux.**

« **E**n radiothérapie, nous sommes passés de la 2D à la 3D permettant de mieux conformer les faisceaux d'irradiation au volume de la tumeur, puis à la modulation d'intensité des doses délivrées et à la radiothérapie stéréotaxique, qui permet de délivrer de fortes doses de rayons sur de très petits volumes tumoraux tout en protégeant les tissus sains environnants, relate le Pr Olivier Chapet, chef du service de radiothérapie de l'hôpital Lyon Sud et président de la Société française de radiothérapie oncologique (SFRO). Aujourd'hui, les évolutions technologiques nous font franchir une nouvelle étape avec la radiothérapie adaptative, qui représente potentiellement une évolution majeure de notre discipline ».

AJUSTER LE CIBLAGE DE LA ZONE À IRRADIER

Historiquement, et encore aujourd'hui dans la pratique conventionnelle, le plan de traitement du patient est élaboré avant la première séance de radiothérapie, après avoir localisé la tumeur, délimité les organes à risque et établi les doses d'irradiation adéquates à délivrer pour éliminer les cellules cancéreuses. Ce plan sert ensuite de référence pour l'ensemble du traitement. « Or, entre la première et la dernière séance, la tumeur peut changer de taille ou de position et les organes environnants peuvent sensiblement se déplacer ou se modifier

sous l'effet d'une perte de poids ou d'un remplissage différent des organes digestifs », souligne le Dr Morgan Michalet, MCU-PH dans les services d'oncologie-radiothérapie du CHU de Nîmes et de l'Institut du Cancer de Montpellier. La radiothérapie adaptative vise précisément à intégrer ces variations, afin d'ajuster le ciblage de la zone à irradier.

IRM ET CBCT : DES USAGES COMPLÉMENTAIRES

Deux grandes modalités d'imagerie sont aujourd'hui utilisées pour la radiothérapie adaptative : l'IRM et la CBCT. « L'IRM offre un contraste particulièrement intéressant pour les tissus mous et permet, grâce à certains équipements, de suivre la cible pendant l'irradiation. Lorsque celle-ci sort d'une zone prédéfinie, le faisceau peut être immédiatement interrompu, explique le Dr Michalet. Cette capacité ouvre des perspectives dans les localisations mobiles et complexes, comme le pancréas, par exemple, qui peut désormais être traité en conditions stéréotaxiques (hypofractionnement extrême). Les techniques guidées par CBCT sont, elles, aujourd'hui surtout utilisées pour des traitements modérément hypofractionnés, notamment dans le cas de cancer de la prostate ou de la vessie ».



UNE ADAPTATION À CHAQUE SÉANCE

Dans sa forme dite « offline », la technique consiste à interrompre temporairement le traitement lorsque des changements anatomiques importants sont constatés, puis à refaire un examen d'imagerie et une nouvelle planification, avant de reprendre les séances d'irradiation. Née vers la fin des années 2010, la radiothérapie adaptative dite « online », ou « en ligne » en français, change la donne : « *L'adaptation est réalisée à chaque séance, tandis que le patient est installé sur la table de traitement. Une nouvelle image de type IRM, scanner ou CBCT (tomodensitométrie à faisceau conique) est acquise ; les contours de la tumeur et des organes à risque sont vérifiés, voire adaptés à l'anatomie du jour ; la dosimétrie est recalculée ; le plan adapté est contrôlé puis validé avant l'irradiation* », résume Raphaël Petazzoni, responsable de la commercialisation des produits et du marketing au sein de l'entreprise Elekta.

UNE INNOVATION DE RUPTURE

Pour les professionnels de santé comme les patients, les perspectives sont réelles. « *En radiothérapie, pour compenser les incertitudes liées aux mouvements des organes ou de la tumeur, les plans de traitement intègrent traditionnellement des marges de sécurité autour de la cible*, relate le Dr Fabrice Lorchel, oncologue radiothérapeute à la polyclinique du Val de Saône à Mâcon. *Celles-ci peuvent toutefois conduire à irradier davantage les tissus environnants. En adaptant le traitement aux variations anatomiques observées à chaque séance, il est possible de mieux protéger les organes sains tout en garantissant la couverture de la tumeur* ».

UNE TECHNIQUE, DEUX LOGIQUES D'ÉQUIPEMENT

La radiothérapie adaptative peut aujourd'hui être mise en œuvre grâce à :

- **Des équipements dédiés** associant accélérateurs de particules (pour délivrer la radiothérapie) et IRM ou CBCT au sein d'une même plateforme, pour réaliser l'acquisition de l'image, la modification des contours, le recalcul du plan de traitement et l'irradiation.
- **Des équipements non dédiés** reposant sur l'utilisation d'accélérateurs déjà présents dans les services, auxquels sont adjoints un environnement logiciel avancé (systèmes de planification de traitement et logiciels de guidage spécifiques permettant de calculer et de délivrer des doses de manière extrêmement précise) ainsi qu'un équipement d'imagerie embarquée. « *Cette seconde voie pourrait constituer un levier important de diffusion de la radiothérapie adaptative, en permettant à davantage de centres d'accéder à la technique sans systématiquement acquérir une nouvelle plateforme dédiée*, explique le Dr Fabrice Lorchel. *Elle reste néanmoins conditionnée à plusieurs exigences, en particulier la qualité de l'imagerie embarquée, la rapidité des outils de calcul et la sécurisation du workflow* ».



En adaptant le traitement aux variations anatomiques observées à chaque séance, il est possible de mieux protéger les organes sains.



En outre, lorsque l'indication le permet, une dose plus importante peut être délivrée à chaque séance, réduisant ainsi leur nombre total. « *Aujourd'hui, le bénéfice dosimétrique de la radiothérapie adaptative est bien établi. L'enjeu est désormais de montrer qu'il se traduit aussi par un bénéfice clinique : une réduction des toxicités, une amélioration de la qualité de vie ou encore, de meilleurs résultats thérapeutiques* », conclut le Dr Michalet. Une étape indispensable pour envisager une prise en charge pérenne de cette technique par l'Assurance maladie et faciliter son essor.

Une diffusion encore insuffisante de la technique



La radiothérapie adaptative en ligne est une technique relativement récente. Les premières installations françaises remontent à la fin des années 2010. Son déploiement reste toutefois lent, en raison de nombreux freins.

À Montpellier, un premier système de radiothérapie adaptative « online » a été installé en 2019. Aujourd'hui, l'ICM en comprend trois : un avec guidage IRM et deux avec guidage CBCT. « Nous réalisons une dizaine de traitements adaptatifs par jour », résume le Dr Morgan Michalet. Au total, Fabien Colaone, directeur du remboursement et de l'accès au marché pour la région Europe, Moyen-Orient et Afrique chez Siemens Healthineers, estime que moins de trente équipements sont installés en France, toutes marques et toutes modalités confondues. « C'est peu par rapport au parc d'environ 600 accélérateurs linéaires existant et insuffisant pour couvrir le territoire français », reconnaît-il.

UN ENJEU ORGANISATIONNEL

Plusieurs freins subsistent. « Outre son coût, la technique mobilise, au moment de la séance, un radiothérapeute, un radiophysicien chargé de réadapter le plan de traitement et deux manipulateurs en électroradiologie médicale (MERM), ce qui n'est pas sans contrainte organisationnelle », évoque le Dr Fabrice Lorchel. La SFRO estime, en effet, que le coût d'un IRM-Linac – équipement qui combine un accélérateur linéaire (Linac) et un système d'imagerie par résonance magnétique (IRM) – est 2,5 à 4 fois supérieur à celui d'autres accélérateurs et permet de traiter environ quatre fois moins de patients, les séances étant plus longues ⁽¹⁾. Le développement de la radiothérapie adaptative suppose donc de faire évoluer les organisations comme les compétences de chacun. « Plusieurs établissements travaillent déjà avec des protocoles de coopération permettant à des manipulateurs

UNE PÉNURIE DE MERM

« La radiothérapie adaptative demande des équipes, de la disponibilité, du temps et de la formation », souligne le Dr Fabrice Lorchel. Elle se développe toutefois dans un contexte de pénurie de manipulateurs en électroradiologie médicale (MERM), déjà sensible dans plusieurs territoires et notamment en Île-de-France. Plusieurs facteurs sont avancés pour expliquer ces tensions : des promotions qui se réduisent au cours du cursus de formation, mais aussi l'absence de corrélation entre le nombre d'installations d'équipements lourds et le nombre de places en formation MERM. Dans ce contexte, la capacité globale des instituts de formation a progressé de plus de 40 % entre 2020 et 2025. Des protocoles de coopération permettent également à des MERM spécifiquement formés d'assurer certaines tâches, comme le contournage, la validation du plan réoptimisé ou encore, la vérification du positionnement du patient avant l'irradiation, par exemple. Sans doute faut-il aller plus loin. « La montée en compétences des manipulateurs est nécessaire pour améliorer l'efficacité de la radiothérapie adaptative », confirme le Dr Lorchel. Une évolution qui peut enrichir le métier, le rendre plus attractif, tout en permettant de faire évoluer l'organisation des équipes. La SFRO plaide quant à elle, avec l'Institut national du cancer (INCa), pour une filiarisation de la dernière année de la formation des MERM.

spécialement formés d'assumer de nouvelles missions, notamment certaines étapes de contournage », détaille le Dr Lorchel, qui appelle à leur montée en capacité.

(1) Source : Le « Livre blanc de la radiothérapie » de la SFRO, 2026.

L'ENJEU D'UN ACCÈS ÉQUITABLE AUX SOINS

À noter qu'en Angleterre ou aux Pays-Bas, où la technique est plus répandue qu'en France, « les MERM disposent, dans certains centres, de compétences plus étendues leur permettant d'assurer une grande partie des tâches à accomplir (recontourage, re planification, validation de la bonne délivrance des doses...), médecins et physiciens intervenant dans un rôle de supervision, de validation finale et de support », souligne Fabien Colaone. La pénurie de MERM en France, néanmoins,

pose un certain nombre de difficultés. Surtout, « en dépit des ressources supplémentaires qu'elle mobilise, la radiothérapie adaptative ne fait pas l'objet d'un remboursement spécifique, limitant ainsi son adoption », poursuit M. Colaone, qui insiste sur la nécessité de « construire un modèle de financement adapté à cette innovation » et de « donner aux centres les moyens humains, matériels et organisationnels nécessaires à sa mise en œuvre ». En toile de fond « se pose l'enjeu d'un accès équitable à cette technique de pointe sur l'ensemble du territoire », résume-t-il.

DE BELLES PERSPECTIVES

D'un point de vue technologique, la radiothérapie adaptative devrait continuer à progresser au rythme des innovations en matière d'imagerie. « Le PET scan propose déjà des traceurs qui permettent de mieux identifier les tissus tumoraux », évoque la SFRO dans son livre blanc paru en 2026. Le développement de nouveaux traceurs devrait renforcer la place de cette modalité d'imagerie dans les traitements de radiothérapie externe. Par ailleurs, les progrès de l'IRM, en termes de qualité d'image comme de modalités de cet examen (morphologique, fonctionnelle et radiomique), « ouvrent des perspectives nouvelles dans l'adaptation des traitements », poursuit-elle. Les « premières IRM de simulation sont commercialisées. Pour l'instant installées dans seulement quelques centres de radiothérapie, elles pourraient dans les prochaines années remplacer les scanners de simulation ». De plus, l'évolution des accélérateurs « se fait aujourd'hui vers une intégration de ces deux modes d'imagerie en cours de traitement pour optimiser les approches de radiothérapie adaptative », ajoute la SFRO. Les IRM-Linac, combinant une IRM et un accélérateur linéaire de radiothérapie, « sont, pour l'instant, réservés à quelques centres experts en raison de leur coût d'installation et l'absence de remboursement adapté des séances. Cependant, le potentiel de ces machines est considérable », note-t-elle. L'essor de l'IA ouvre elle aussi de belles perspectives. « Des logiciels de contournage automatique permettent déjà de délinéer en quelques minutes les organes à risque de toxicité. Le contournage automatique des volumes cibles représente la prochaine étape », juge-t-elle. Enfin, les « plans de traitement seront certainement optimisés par des logiciels de planimétrie pilotés par l'IA, conclut-elle. La puissance de calcul surpassera ce que peut faire l'humain. L'IA prendra de même une place de plus en plus importante dans les contrôles qualité des accélérateurs et différents matériels utilisés en radiothérapie ».

Source : Le « Livre blanc de la radiothérapie » de la SFRO, 2026, qui liste « dix priorités » pour une « oncologie moderne ».



Quel financement pour la radiothérapie adaptative ?

Une réforme du financement de la radiothérapie entrera en vigueur le 1^{er} janvier 2027 en France. Si elle constitue une avancée, elle ne prévoit pas, pour l'heure, de prise en charge spécifique de la radiothérapie adaptative en ligne.

À compter du 1^{er} janvier prochain, les tarifs des actes de radiothérapie externe et curiethérapie seront harmonisés entre les établissements publics et privés, sur la base d'une nomenclature rénovée. Cette réforme marque également le passage d'une rémunération principalement fondée sur le nombre de séances à une logique de « forfait par épisode de soins », explique le Pr Olivier Chapet.

PAS DE REMBOURSEMENT SPÉCIFIQUE

Une avancée réelle. « La nouvelle nomenclature ne prévoit pas, à ce stade, de remboursement spécifique de la radiothérapie adaptative en ligne, nuance toutefois Raphaël Petazzoni. Ceci étant, plusieurs variables ont été créées à des fins statistiques. La radiothérapie adaptative en ligne en est une et les centres pourront ainsi déclarer les séances réalisées à l'aide de cette technique. Les données recueillies pourront être analysées a posteriori par les autorités de santé ». Les travaux, associant la DGOS, l'ATIH, la SFRO, le Snitem et les autres parties prenantes concernées, se poursuivent pour que la technique soit, à l'avenir, pleinement reconnue et valorisée.

VERS UN FORFAIT INNOVATION ?

« L'un des obstacles identifiés réside dans le niveau de preuves cliniques actuellement disponible, détaille le Pr Chapet. À ce jour, les autorités de santé considèrent que nous ne disposons pas encore de preuves scientifiques suffisamment établies démontrant le bénéfice de la radiothérapie adaptative par rapport à la radiothérapie

conventionnelle ». L'une des pistes étudiées consisterait donc à recourir au forfait innovation. « Cette solution permettrait à la fois de commencer à valoriser l'acte, tout en recueillant, dans le même temps, les données cliniques nécessaires, développe-t-il. En tant que président de la SFRO, j'ai donc saisi notre commission Recherche afin de travailler sur la mise en place de ce dispositif. Nous avons sollicité le Snitem pour qu'il soit partenaire de cette démarche et que nous puissions avancer collectivement. Aujourd'hui, ce projet de forfait innovation est en cours et avance plutôt bien ».

DÉMONTRER UN BÉNÉFICE CLINIQUE

L'idée « est de travailler à la définition d'un forfait portant sur une ou deux indications pour lesquelles nous chercherions à démontrer un bénéfice clinique, avec un suivi des patients sur plusieurs années, par exemple, dans le cadre d'une étude clinique française multicentrique », explique M. Petazzoni. Deux indications ont notamment été évoquées dans les premiers échanges : le cancer de la prostate et les cancers ORL.

Le périmètre n'est toutefois, à ce jour, pas encore arrêté. L'objectif est notamment de documenter la capacité de la technique à réduire les marges de sécurité autour de la cible et, par conséquent, l'irradiation des tissus sains et les effets secondaires associés. À cette dimension clinique s'ajoute un enjeu médico-économique : moins d'effets indésirables peut aussi signifier moins de prises en charge ultérieures ou d'hospitalisations ⁽¹⁾. « Le but, in fine, est d'avoir un forfait dédié de radiothérapie adaptative », résume-t-il.

(1) L'hypofractionnement sévère rendu possible par cette technique contribue déjà à réduire de manière significative le nombre de déplacements des patients vers les centres de radiothérapie.

MANIPULATEURS EN ÉLECTRORADIOLOGIE MÉDICALE

L'enjeu de former, reconnaître, fidéliser

Aurélien De Oliveira, cadre de département en radiothérapie oncologique au sein de l'Institut Curie et responsable de la commission Radiothérapie de l'association française du personnel paramédical d'électroradiologie (AFPPE), **appelle à ce que l'expertise des MERM soit mieux reconnue.**



Snitem Info : Pouvez-vous, revenir sur les principaux freins au déploiement de la radiothérapie adaptative ?

Aurélien De Oliveira : Ces équipements représentent un investissement important et leur fonctionnement nécessite davantage de ressources humaines qu'un accélérateur linéaire classique. Or, la radiothérapie externe est confrontée à des tensions de recrutement, notamment chez les MERM, et ce, dans de nombreux centres, ce qui fragilise les organisations et peut limiter le développement des nouvelles techniques et pratiques. La radiothérapie adaptative transforme également les missions et organisations des professionnels. Sans équipes suffisamment nombreuses, disponibles et formées, il est difficile d'exploiter pleinement le potentiel de cette technique et de garantir une équité d'accès aux soins sur l'ensemble du territoire national.

S.I. : La radiothérapie externe souffre-t-elle d'un déficit d'attractivité auprès des MERM ?

A.D.O. : Oui, et c'est un enjeu important. On compte un peu moins de 30 000 manipulateurs en France, mais seuls 10 % d'entre eux environ choisissent d'exercer en radiothérapie externe en sortie de formation. La profession donne en effet accès à différentes modalités : la radiothérapie, mais aussi la radiologie, l'IRM, la médecine nucléaire, l'électrophysiologie... Il faut donc renforcer l'attractivité de la radiothérapie externe en agissant sur plusieurs leviers : la reconnaissance du métier et des expertises, les conditions d'exercice, la rémunération et les perspectives d'évolution de carrière.

S.I. : Faut-il spécialiser davantage la formation des MERM ?

A.D.O. : À mon sens, il est important de préserver le socle commun. La formation initiale de trois ans permet aux MERM

d'exercer dans différents domaines et cette polyvalence constitue une force. En revanche, nous avons besoin de formations complémentaires diplômantes et d'évolutions de carrière valorisant certaines activités, expertises et compétences.

S.I. : La délégation ou le transfert de certaines tâches peut-il, faciliter le développement de la radiothérapie adaptative ?

A.D.O. : C'est tout à fait envisageable, notamment à travers les protocoles de coopération. Faire intervenir systématiquement quatre professionnels à l'occasion d'une même séance mobilise beaucoup de ressources humaines. Certaines activités aujourd'hui réalisées par un oncologue-radiothérapeute ou un physicien médical pourraient être transférées à des MERM. Mais cela nécessite un cadrage qui doit reposer sur un protocole de coopération qui, par essence, limite fortement le nombre d'activités transférées. Pour transférer une ou plusieurs activités, les MERM doivent disposer des compétences nécessaires et leur niveau d'expertise doit être reconnu.

S.I. : La pratique avancée constitue-t-elle une piste pour faire évoluer la profession ?

A.D.O. : Oui, clairement. Les protocoles de coopération offrent des possibilités, mais qui restent toutefois limitées et la mise en œuvre est relativement lourde. Il faut aujourd'hui aller plus loin, en définissant un cadre plus large et des perspectives d'évolution professionnelle reconnues au niveau national. Le développement de la pratique avancée pour les MERM, à l'image de ce qui existe pour les infirmiers, constitue à ce titre une piste importante pour répondre aux besoins d'accès aux innovations et de fluidification des parcours de soins.