

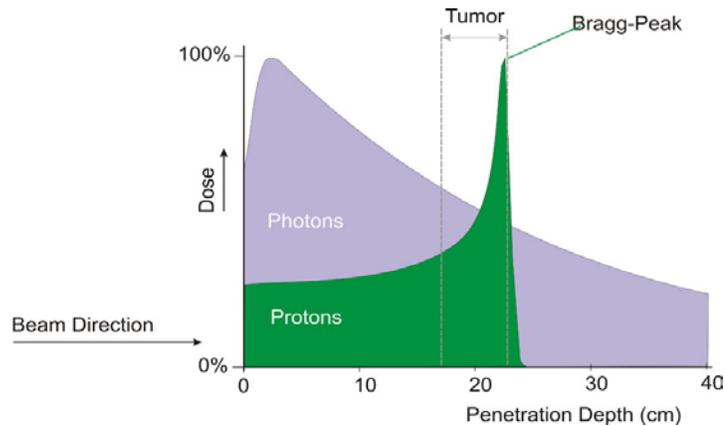
Un nouveau scalpel pour les médecins: l'hadronthérapie par synchrocyclotron

Les applications de la physique nucléaire et de la physique des particules dans le domaine médical sont nombreuses, aussi bien pour les outils utilisés que pour l'imagerie. On connaît bien les radiographies, la radiothérapie, les scanners. Ces techniques sont basées sur l'utilisation soit des photons, soit des électrons. L'essentiel de la masse de la matière, 99.95%, vient du noyau des atomes. Les protons et les neutrons font partie de la famille des hadrons. Les hadrons électriquement chargés (protons ou noyaux) ont une propriété particulière : lorsqu'ils pénètrent dans la matière organique, ils perdent cinq à dix fois plus d'énergie dans le dernier millimètre de leur parcours qu'on long du trajet. C'est ce qu'on appelle le "pic de Bragg". D'où l'idée de les utiliser pour viser et détruire certaines zones cancéreuses.

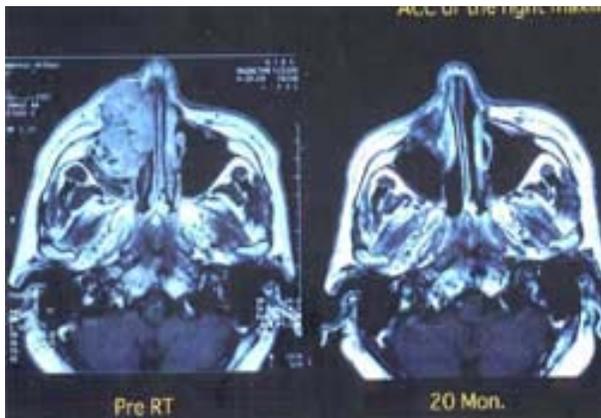
Le pic de Bragg

Sir William Lawrence Bragg a reçu le prix Nobel en 1915 avec son père Sir William Henry Bragg pour leurs travaux sur la diffraction des rayons X. Les travaux ont ensuite porté sur les comportements des particules dans la matière. Les recherches ont concerné aussi la biologie moléculaire. Elles ont permis de déterminer, pour la première fois, la position exacte des atomes contenus dans les cristaux, ce qui entraînera des progrès considérables dans différentes disciplines. Bragg a étudié le freinage des particules lorsqu'elles traversent la matière. La figure ci-contre illustre le comportement très différent des photons/électrons (utilisés dans la radiothérapie) et des protons. Les premiers perdent leur énergie au fur et à mesure qu'ils s'enfoncent dans la matière, alors que les protons perdent relativement peu d'énergie lors de la pénétration, mais s'arrêtent d'un seul coup. Si le but est de cibler une zone cancéreuse, avec la radiothérapie, on détruit plus fortement les cellules en amont de la zone et on continue de détruire après la zone visée. Avec un hadron, la destruction est environ quatre fois supérieure

dans la zone ciblée qu'en amont, sans destruction en aval. Les dégâts collatéraux sont 10 à 15 fois inférieurs.



Démarche chirurgicale

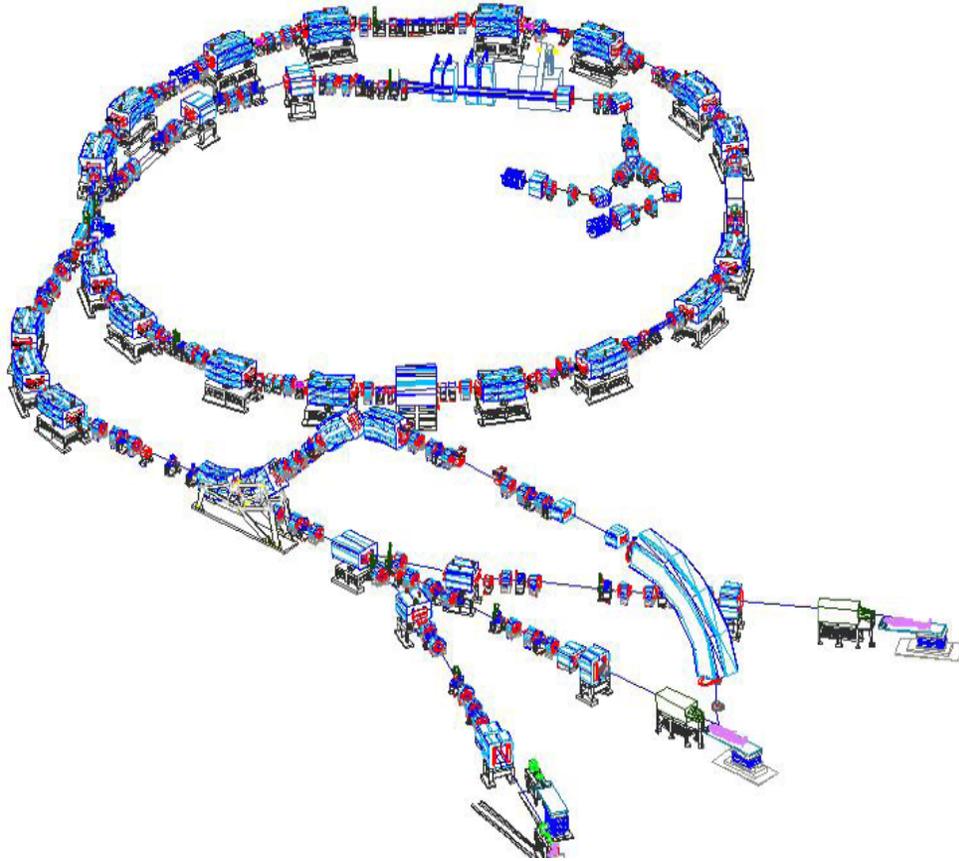


Sur la partie gauche de l'image ci-contre, on voit un la tête d'un patient porteur d'un carcinome. Lors du traitement par hadronthérapie, la première opération consiste à réaliser une image 3-D de la zone à traiter : elle peut être obtenue par IRM (résonance magnétique nucléaire) ou scanner (radiographie) ou autres. Cette image est répertoriée par rapport à un référentiel géométrique -des microbilles d'or implantées sous la peau du patient-. Le patient est ensuite amené dans la salle de traitement en bout d'une ligne de faisceau d'hadrons. Ce

faisceau est automatiquement guidé par référence au système de microbilles. Il balaye une couche de la tumeur à la manière du balayage dans les tubes cathodiques de nos anciens téléviseurs. La profondeur d'attaque est réglée en adaptant l'énergie du paquet d'hadrons. La partie droite de l'image ci-contre a été prise après le traitement.

Comment sont obtenus les faisceaux de particules?

Les premiers accélérateurs de particules, les cyclotrons, ont été inventés par Ernest Orlando Lawrence en 1931. Dans un cyclotron, les particules accélérées se déplacent dans un champ magnétique uniforme et suivent une trajectoire en forme de spirale. Ce type d'accélérateur est utilisé depuis de nombreuses années (1975 à Berkeley, USA) pour l'hadronthérapie. Il permet de fournir des faisceaux de particules à énergie fixe (entre 30 et 70 MeV). Il existe actuellement dans le monde une trentaine de centres équipés de ce type d'accélérateurs (Orsay, Nice en France). Ils permettent de traiter chacun environ 200 cas par an. Les résultats sont remarquables. Le nombre de malades dont la guérison, sinon la survie à plus de 5 ans, pourrait être obtenue est cependant beaucoup plus élevé, on l'estime à 20 000 /an en France. Cependant depuis quelques années, des centres d'hadronthérapie basés sur des **synchrocyclotrons** sont implantés ou en cours de construction dans plusieurs pays du monde. Mis au point en 1946 à Berkeley, les synchrocyclotrons équipent tous les centres de recherche en physique des particules dans le monde. Le CERN à Genève, avec ce type d'instrument, a été à la base de la confirmation de ce qu'on appelle maintenant « le modèle standard » qui guide les découvertes et recherches des 40 dernières années. Ce type d'accélérateur a une structure modulaire d'aimants dipolaires, quadripolaires et plus, permettant une grande flexibilité non seulement en énergie, mais aussi en taille et intensité des faisceaux. Alors que le cyclotron ne peut fournir qu'un faisceau circulaire de taille fixe, un synchrocyclotron peut fournir des faisceaux de forme et taille variables- du point au bâtonnet-. Ce dernier permet de s'adapter au cas par cas à chaque tumeur, d'un cycle d'irradiation à l'autre, un cycle durant environ une seconde. Ils permettent d'atteindre des énergies de particules plus élevées et donc des profondeurs de tumeurs plus importantes (ceci est primordial pour des tumeurs du cerveau ou du foie ou de l'appareil digestif). Ils permettent aussi de varier les projectiles, protons ou ions légers comme le carbone C^{6+} . Le bilan financier est nettement plus favorable : pour un coût à peine deux fois supérieur, on peut traiter 20 à 30 fois plus de patients.

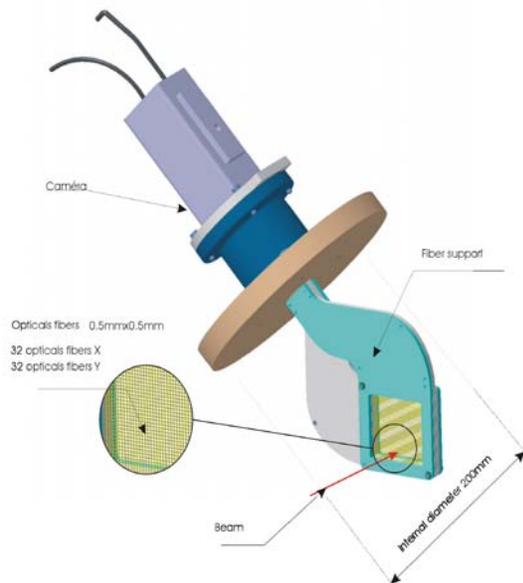


CI contre une vue schématique du synchrocyclotron du centre CNAO (Centro Nazionale di Adronica Oncologici) de l'hôpital de Pavia, en Italie, elle montre les sources de particules au centre de l'anneau accélérateur et les faisceaux secondaires dirigés vers quatre salles de traitement. Le diamètre de l'anneau est environ de 20m.

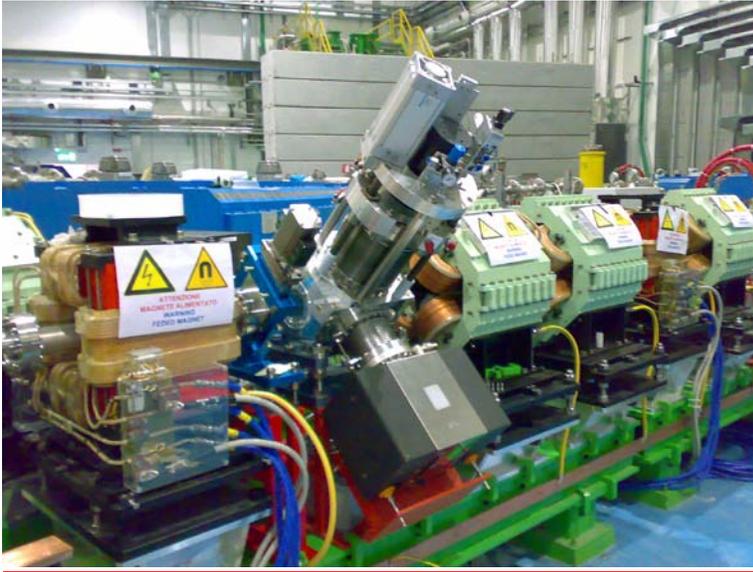
Le guidage des faisceaux vers les patients

Le but est de viser une zone à traiter chez le patient avec une précision inférieure au mm. Jusqu'à présent les détecteurs utilisés pour les faisceaux de particules des installations avec des cyclotrons étaient de type chambre à fils. Ces détecteurs inventés par Georges Charpak ont bien remplis leurs fonctions ; pour des installations plus puissantes, ils présentent néanmoins

des phénomènes de saturation. Le laboratoire LLR à l'Ecole Polytechnique a acquis une longue expérience dans la construction de détecteurs à base de fibres optiques scintillantes, en particulier pour des faisceaux au CERN. Sur demande de CNAO le LLR a étudié la possibilité d'adapter la technique des fibres optiques scintillantes à l'hadronthérapie. Le laboratoire a conçu un système de localisation et de mesure de profils avec des ensembles à deux plans de réseaux de fibres optiques de section carrée $0.5 \times 0.5 \text{ mm}^2$. Le principe est simple, les particules protons ou ions carbone qui traversent les fibres déposent une très faible partie de leur énergie dans la fibre, cette énergie se dégrade en lumière dont une partie est captée et guidée vers l'extrémité de la fibre. Une caméra à capteur CCD est montée au bout des fibres. L'enregistrement des images se fait exactement comme avec un appareil photo ou caméscope du commerce. Ce système a l'avantage aussi de ne pas nécessiter d'entretien et de surveillance particulière, ni de surveillance de système à gaz comme pour les chambres à fils. Il ne présente pas de phénomène de saturation.



Les deux vues représentent le principe du profileur et après son installation dans sa boîte à CNAO.



L'hadronthérapie a démontré son efficacité depuis de longues années. Dans le cas particulier des tumeurs du cerveau, le taux de survie après cinq ans est d'environ 15% avec les moyens traditionnels, l'hadronthérapie permet quasiment de renverser la proportion. C'est aussi une intervention légère, puisque lors de nos essais au centre de PSI à Villigen, Suisse, la patiente est venue et repartie en vélo.

Les progrès et la maîtrise des accélérateurs et des techniques associées acquis au long des années permettent maintenant au plus grand nombre de patients d'accéder à ce traitement.

Référence : Rossi + Bossler