

le champ électromagnétique d'un noyau, peut se transformer en une paire électron-positon : c'est l'effet de création de paires.

Ainsi, le nombre de photons contenus dans le faisceau diminue à mesure qu'il progresse dans les tissus. L'énergie qu'un faisceau de rayons X dépose quand il pénètre dans un organisme est maximale dans une zone située à quelques centimètres sous la peau. La probabilité qu'un photon interagisse avec la matière est faible, mais quand une telle interaction a lieu, les photons perdent leur énergie, parfois en totalité. Ainsi, le nombre de photons qui atteignent la cible diminue de façon exponentielle, mais ceux qui y parviennent ont conservé leur énergie initiale, c'est-à-dire leur efficacité pour détruire les cellules tumorales cibles. C'est pourquoi de nombreux faisceaux pénétrant dans le patient par des points d'entrée différents sont nécessaires pour que la dose maximale soit dépo-

sée dans la tumeur. Nous l'avons indiqué, en hadronthérapie, les photons sont remplacés par des ions. La substitution présente un avantage balistique : même avec un seul faisceau, la dose est maximale dans la tumeur. Examinons pourquoi.

Les ions utilisés sont des protons ou des ions carbone. Les protons sont exploités dans une trentaine de centres de protonthérapie répartis dans le monde, dont deux sont situés en France, un au Centre Antoine Lacassagne, à Nice, et un au Centre de protonthérapie d'Orsay – Institut Curie. Ces ions produits par une source sont injectés dans un accélérateur circulaire, un cyclotron. Quand l'accélérateur est un synchrotron, les ions sont d'abord accélérés dans une section droite. Les dispositifs utilisant des cyclotrons sont plus compacts et plus simples, mais ils ne permettent pas de faire varier l'énergie des ions aussi facilement qu'avec un synchrotron.

Les ions y atteignent des vitesses très élevées, de l'ordre de 70 pour cent de la vitesse de la lumière. Ces ions ont des énergies de plusieurs millions d'électronvolts par unité de masse atomique, ce qui leur permet de parcourir plusieurs dizaines de centimètres dans des tissus biologiques.

En fait, à de telles vitesses, ce sont des ions « déshabillés », c'est-à-dire des noyaux d'hydrogène portant une charge positive ou des noyaux de carbone portant six charges positives qui pénètrent dans l'organisme du patient. Ces ions, chargés positivement, interagissent avec les électrons du milieu, mais ces interactions sont peu intenses (car les ions sont très rapides). C'est pourquoi les ions perdent peu d'énergie. Cette perte se fait en continu sur le parcours des ions. Mais plus ils ralentissent, plus ils interagissent et plus ils perdent d'énergie dans les tissus qu'ils traversent, et... plus ils ralentissent.

