



Avec l'aimable autorisation de IBA

4. LE MALADE est allongé sur la table centrale d'un dispositif d'hadronthérapie. Le faisceau, orientable, délivre les ions accélérés issus d'un synchrotron ou d'un cyclotron. Les machines actuelles ne sont pas toutes équipées de dispositifs permettant le suivi des particules promptes, et, pour les centres équipés d'une TEP, il faut déplacer le malade pour vérifier que l'irradiation a été correcte.

de la fragmentation ont une vitesse de l'ordre de celle du projectile qui s'est fragmenté. Pour la protonthérapie, où l'énergie du projectile est plus faible, cette technique semble exclue, car très peu de protons prompts émis lors de la fragmentation auraient une énergie suffisante pour sortir du patient.

Les protons prompts : d'autres mouchards

En revanche, les protons prompts sont émis en grand nombre par l'ion carbone lors de sa fragmentation sur sa cible ou de la cible elle-même. Comment peut-on espérer repérer la position du pic de Bragg à l'aide des protons prompts émis ? Rappelons que le nombre de fragmentations et, par conséquent, le nombre de fragments émis dépendent de la distance parcourue dans le milieu ou dans le patient. En d'autres termes, après le pic de Bragg, le projectile ne déclenche plus aucune fragmentation.

On peut montrer que la distribution de protons chute à la fin du pic de Bragg, mais sans présenter de maximum marqué (contrairement à la quantité d'énergie déposée). En localisant les volumes élémentaires (ou voxels) où ont lieu la fragmentation et la production des protons, et en comparant la carte obtenue avec celle qui a été simulée, on espère pouvoir vérifier que la dose a été déposée correctement. Cette approche présente un avantage notable par rapport à celle qui utilise les photons prompts comme mouchards : il est bien plus simple de détecter des particules chargées que des photons.

Le taux de comptage est beaucoup plus élevé et permet de dénombrer les événements de fragmentation dans chaque voxel à condition que ces événements soient assez nombreux pour que la statistique soit suffisante. Nous pensons utiliser les dispositifs développés initialement pour détecter les particules dans les grands accélérateurs, tel le projet de Collisionneur linéaire international, ILC. Soulignons que l'utilisation de tels détecteurs dans des machines de hadronthérapie serait un nouvel exemple d'une application pratique issue d'une recherche fondamentale.

Quel en est le principe ? On repère un proton qui donne des signaux dans deux détecteurs qu'il traverse et qui sont situés autour de la tête du patient, si c'est le cerveau qui est traité. Les deux positions permettent d'obtenir une droite, laquelle coupe la droite définie par le faisceau incident, au point où le proton prompt a été émis. On peut envisager de confirmer la localisation de ce voxel où a eu lieu la fragmentation grâce à une deuxième droite résultant de l'interaction d'un autre proton, issu de la même fragmentation.

Mais la probabilité de détecter deux protons issus d'une même fragmentation étant très faible, une telle confirmation reste difficile à obtenir. Nos simulations confirment que la méthode par coïncidence ne pourra fonctionner qu'avec des détecteurs de grande taille, et, par conséquent, très onéreux. Quoi qu'il en soit, la confirmation par un proton prompt devrait déjà permettre de vérifier le site du dépôt de l'énergie avec une précision intéressante pour une application médicale.

Malgré tous ces avantages et les bons résultats issus des simulations, il existe plusieurs limitations à cette technique. Nous l'avons évoqué, elle ne fonctionne *a priori* qu'avec les centres d'hadronthérapie utilisant des ions carbone. Une autre limitation résulte des mécanismes d'interaction des protons dans la matière. Plus leur parcours dans les tissus biologiques est long, plus ils perdent d'énergie. Ainsi, si les protons prompts qui sont créés doivent ensuite traverser une épaisseur importante de matière, ils perdent beaucoup d'énergie et risquent de ne pas ressortir du patient ou d'en ressortir après avoir changé de direction, ce qui limite la précision de la méthode. Des études complémentaires sont en cours dans plusieurs laboratoires afin d'optimiser cette technique.

Comme nous l'avons évoqué, de très nombreuses recherches sont en cours pour améliorer l'efficacité et la sûreté de cette thérapie innovante qui permet d'épauler la radiothérapie dans certaines pathologies spécifiques. Des médecins, en collaboration avec des physiciens, informaticiens, radiobiologistes, physiciens des accélérateurs cherchent à comprendre, quantifier, imager et modéliser les nombreux processus physiques et biologiques qui sont mis en jeu quand des ions traversent la peau d'un malade et se propagent jusqu'à la tumeur.

L'hadronthérapie a déjà fait ses preuves dans de nombreux pays : même si cela représente une très faible proportion des traitements de radiothérapie (environ 0,5 pour cent), aujourd'hui, plus de 100 000 personnes ont été traitées par hadronthérapie dans le monde (protons et ions carbone confondus). Toutefois, l'accélération des faisceaux d'ions carbone ou de protons qui doivent pénétrer parfois jusqu'à 30 centimètres dans le patient nécessite des équipements complexes dont les coûts sont élevés. C'est la raison pour laquelle leur nombre est limité dans le monde et notamment en France.

Mais plusieurs projets sont à l'étude : l'évolution des centres de protonthérapie existants à Orsay (ICPO) et à Nice (IMPACT), un troisième centre de protonthérapie à Toulouse (PERICLES), et deux centres d'hadronthérapie par carbone, un de traitement et de recherche à Lyon (ETOILE), et un dédié à la recherche à Caen (ARCHADE). Ils devraient permettre à la France de rester parmi les pays pionniers et innovants dans ce domaine. ■

Trente secondes avant **LE MÉGASÉISME**

Richard Allen

Pour se préparer au *Big One*, le mégaséisme qu'elle attend, la Californie développe *Shake Alert*, un système d'alerte rapide capable d'avertir plusieurs dizaines de secondes à plusieurs minutes à l'avance qu'une violente secousse va se produire.

L'ESSENTIEL

✓ Les réseaux d'alerte sismique rapide détectent les toutes premières ondes d'un tremblement de terre et donnent l'alerte plusieurs dizaines de secondes à l'avance, ce qui laisse le temps de se préparer au choc.

✓ Leur principe repose sur la détection des ondes de compression, qui arrivent toujours avant les ondes de cisaillement, les plus destructrices.

✓ Plus le réseau de sismomètres surveillant la zone sismique est étendu, plus le système d'alerte sismique rapide est fiable et ses prévisions en termes de magnitude précises.

✓ De par le monde, plusieurs réseaux d'alerte sismique rapide ont déjà fait leurs preuves. Un tel dispositif – le système pilote *Shake Alert* – est en cours de test en Californie.

Tom Whalen

Les tremblements de terre ne préviennent jamais. À cet égard, le séisme californien de Loma Prieta du 17 octobre 1989 est typique : peu après 17 heures, une rupture soudaine de la faille de San Andreas secoue assez fort la région de la baie de San Francisco pour abattre plus de deux kilomètres d'une autoroute à deux étages, détruire des parties du pont reliant San Francisco à Oakland, sa ville jumelle de l'autre côté de la baie, et tuer plus de 60 Californiens, pourtant bien préparés. Et cela recommencera. Mais quand ?

Une menace permanente est si inacceptable, que, depuis l'Antiquité, les hommes essaient de s'en prémunir. C'est pourquoi les sismologues ont toujours traqué le « signal précurseur » qui, même ténu, devrait permettre de déterminer où et quand tremblera la terre. Une traque qui n'a rien donné, à tel point que les chercheurs sont nombreux aujourd'hui à douter de l'existence même de ce signal...

Alerte en temps réel

Quoi qu'il en soit, tout espoir de protéger les populations n'est pas perdu. Dès les tout premiers mouvements du sol, les sismologues peuvent aujourd'hui prévoir en quelques secondes et avec assez de certitude l'intensité et la portée d'un tremblement de terre qui commence. En combinant cette sismologie en temps réel avec les performances des communications modernes, on peut imaginer mettre au point un système d'alerte sismique rapide. C'est ce que nous essayons de faire en Californie, où au sein de l'initiative CISN (pour *California Integrated Seismic Network*, réseau sismique intégré de Californie), plusieurs universités et agences gouvernementales se sont associées pour développer *Shake Alert* (littéralement « Alerte aux secousses »), le projet pilote du système californien d'alerte sismique rapide. Comme les systèmes déjà en place dans le monde, *Shake Alert* est conçu pour donner aux habitants quelques dizaines de secondes, voire une demi-minute d'avance. Certes, cela semble peu, mais c'est bien assez pour stopper les trains, arrêter les centrales nucléaires, ouvrir les portes d'ascenseurs, et prévenir pompiers et secouristes...

L'intérêt qu'à toute avance, même aussi courte, est évident dans le cas du séisme de Loma Prieta. Son épïcéntré se trouvait à quelque 100 kilomètres au Sud de San Francisco dans les montagnes de Santa

Cruz. Depuis le moment de la toute première secousse, les ondes sismiques les plus dévastatrices ont mis plus de 30 secondes pour atteindre San Francisco et Oakland, où sont mortes 80 pour cent des victimes. Si un système d'alerte rapide avait pu annoncer le séisme avec seulement 20 secondes d'avance, cela aurait suffi pour stopper les trains, maintenir les avions en vol, faire passer au rouge les feux à l'entrée des ponts, des tunnels et autres pièges de ce genre... En 20 secondes, les ouvriers travaillant dans les environnements à risque auraient eu le temps de fuir vers des zones sûres, les machines et les systèmes sensibles de se mettre en sécurité, les écoliers et les employés de plonger sous leurs bureaux, etc. Bref, toute une région aurait pu se préparer au choc !

Le genre de système d'alerte rapide qui aurait été nécessaire lors du séisme de Loma Prieta est déjà en place au Japon, au Mexique, à Taïwan, en Turquie, en Roumanie. Le dispositif japonais serait le plus perfectionné au monde. Ces réseaux ont pour fonction de diffuser à l'échelle nationale des alertes par le biais des radios, des chaînes de télévision, des réseaux de téléphonie mobile et des systèmes d'affichage situés par exemple dans les centres commerciaux et dans les espaces publics. Depuis la mise en place des premiers de ces systèmes, il y a trois ans et demi, plus d'une dizaine de tremblements de terre les ont déjà activés. Dans les usines, les écoles, les trains ou les automobiles, les gens ont bénéficié d'un temps limité, mais précieux, pour se préparer, et les alertes n'ont entraîné ni mouvement de panique ni accident routier.

Un système californien d'alerte rapide

Il est donc plus que temps d'avoir aussi un système d'alerte rapide en Californie. Le *Big One*, c'est-à-dire le mégaséisme attendu depuis longtemps, ne s'est pas encore produit sur la faille de San Andreas. S'il est construit à temps, le système d'alerte rapide californien sauvera des vies.

Les plaques tectoniques qui pavent notre planète dérivent, et les continents se heurtent. À leurs marges, des pans entiers de croûte terrestre s'affrontent et se déforment pour absorber les tensions. Or il y a des limites à l'élasticité de la croûte terrestre, ce qui explique que pour relâcher les tensions, elle se rompt par épisodes le long de nombreux plans que