**Contribution aux exercices de prospective 2020-2030**

**Sciences Nucléaires et Vivant**

**Nouvelles méthodes de dosimétrie pour des faisceaux d’ions**

**Contributeurs :** A. Guertin1, F. Haddad1,2, C. Koumeir2, V. Métivier1, N. Servagent1

1Subatech, 2Arronax

**Objectifs scientifiques (2 pages max. avec figures)**

Les irradiations, in-vitro/in-vivo, avec des faisceaux d’ions entre un et quelques dizaines voire centaines de MeV/u sont nécessaires pour les études de radiobiologie et précliniques. La mesure de la dose délivrée et son évolution dans le milieu doivent se faire avec une bonne précision pour pouvoir comparer les données des différentes plateformes. Il est important de mettre en place des observables expérimentales robustes, notamment avec des faisceaux fortement perturbés par le dispositif de mesures et par le milieu, afin de vérifier les paramètres d’irradiations nécessaires à la dosimétrie.

Lors d’expériences de radiobiologie, plusieurs grandeurs physiques, la fluence (nombre d’ions incident/cm²), le parcours des ions dans le milieu irradié et le Transfert d’Energie Linéique (TEL), sont des paramètres importants pour à la fois suivre le déroulement de l’irradiation et remonter à la dose physique déposée dans le milieu. En général, la fluence est mesurée durant l‘irradiation à travers des détecteurs dédiés, le TEL est souvent calculé par simulation et le parcours déterminé par mesure et/ou par simulation.

Les contraintes expérimentales et le choix de la méthode de mesure varient en fonction de l’énergie du faisceau incident. En effet, si on peut se contenter d’avoir une précision submillimétrique pour un faisceau qui a un parcours à l’échelle du centimètre, cette précision n’est plus suffisante dans le cas d’un faisceau de faible énergie (parcours et/ou largeur du pic de Bragg à l’échelle de quelques dizaines de µm). Dans la suite, les méthodes pour déterminer ces grandeurs seront rapidement citées et des propositions de développement seront présentées en fonction de l’énergie du faisceau.

**Fluence**

Pour les faisceaux de haute énergie, la mesure de la fluence peut se faire avec des chambres d’ionisation, des feuilles moniteurs en s’appuyant sur la mesure des rayons X émis, installées à l’intérieur de la ligne de faisceau (sous vide) ou à l’air. Des nouvelles techniques sont en cours de développement comme le profileur PEPITES (basée du l’émission des électrons secondaires) et les détecteurs à base de diamant. Pour les faisceaux de basse énergie, en général, la fenêtre d’extraction à l’air est utilisée pour monitorer l’intensité du faisceau.

Dans le cas d’un faisceau de quelques dizaines de MeV/u qui a besoin d’une certaine épaisseur d’air pour être homogène, l’échantillon biologique se trouve loin de la fenêtre d’extraction et un diagnostic supplémentaire doit être rajouter. Les détecteurs citées ci-dessus, peuvent être utilisés à condition qu’ils soient faiblement interceptifs et donc qu’ils présentent une épaisseur équivalent eau inférieure à 10µm. Cela nécessite de surmonter des défis technologiques.

Ces développements peuvent être bénéfiques pour les autres types de faisceaux car le risque d’endommagement sera alors réduit. Un autre champ à explorer concerne l’émission de particules secondaires lors du passage du faisceau dans l’air et à la surface du milieu irradié, par exemple l’émission liée au rayonnement de freinage.

**Le parcours dans un fantôme**

Le parcours peut être déterminé dans des fantômes dont on connait les caractéristiques physico-chimiques. Plusieurs méthodes, avec une résolution submillimétrique, ont été développées pour les faisceaux de haute énergie en utilisant le signal électrique d’une chambre d’ionisation (ou d’un semi-conducteur mince), la luminescence du milieu irradié avec un système optique, des empilements de films radiochromiques, etc.

À basse énergie, la stratégie est différente, des détecteurs semi-conducteurs sont utilisés pour mesurer l’énergie du faisceau incident ou l’énergie résiduelle suite à son passage à travers des feuilles minces servant d’étalon. Il peut être intéressant de développer des systèmes de mesures avec une résolution micrométrique, basés, par exemple, sur la détection de la lumière émise par un fantôme ou la détection des électrons secondaires dans un milieu gazeux, afin d’imager le parcours des ions de basse énergie et la largeur du pic de Bragg.

**Le parcours dans un milieu biologique**

L’extrapolation vers un milieu biologique irradié des mesures dans un fantôme et/ou des résultats de simulations numériques peut entrainer des erreurs dues à l’hétérogénéité du milieu biologique, que l’on ne connait pas parfaitement. Cette problématique concerne notamment les irradiations in vivo à haute énergie. Des développements, basés sur la détection des rayonnements secondaires (gamma prompts, particules chargées) issus des réactions nucléaires, sont en cours. Il est peut-être intéressant de rajouter à ce panel, le rayonnement de freinage des électrons secondaires rapides. En effet ce signal étant directement lié à la vitesse du faisceau et à la densité des électrons dans le milieu, il devrait alors être possible de le relier à la dose déposée.

**La détermination du TEL**

Nous nous intéressons ici au TEL d’un faisceau mono-énergétique ou du TEL moyen d’un faisceau avec une distribution large en énergie. Il est déterminé par des simulations dans une tranche fine d’eau et peut être mesuré avec un semi-conducteur ultra mince, ramené à un équivalent eau (épaisseur équivalente).

Il est intéressant de déterminer la dose déposée dans le milieu biologique. Pour cela une bonne connaissance des mécanismes d’interaction des ions avec les molécules biologiques, comme des bases de la molécule d’ADN, est nécessaire. Il est donc important de mesurer, avec des faisceaux d’ions dans une gamme d’énergie allant du keV à quelques 10 MeV/u, les sections efficaces d’ionisation totales et différentielles permettant de vérifier les prédictions théoriques et de compléter les bases de données.

**Conclusion**

En fonction des conditions d’irradiation, plusieurs techniques et méthodes ont déjà été développées ou sont en cours de développement pour remonter à la dose déposée. Néanmoins, il reste plusieurs défis à relever :

* Mettre en œuvre des diagnostics faiblement interceptifs pour monitorer les irradiations avec des faisceaux de faible énergie
* Mesurer le parcours des ions de faibles et de hautes énergies et en particulier la forme du pic de Bragg
* Déterminer la dose déposée dans les milieux biologiques

Pour mener à bien ces actions, il est nécessaire d’intensifier les collaborations entre les plateformes de radiobiologie en France, échanger sur les savoir-faire et comparer les différentes méthodes d’obtention de la dose.