

LA PHYSIQUE DES RADIATIONS IONISANTES POUR LES NÉOPHYTES

E. LENAERTS (1), P. COUCKE (2)

RÉSUMÉ : Le développement clinique, à visée diagnostique et thérapeutique, des radiations ionisantes a nécessité une compréhension de la physique. L'exploitation de ces connaissances a mené à des progrès majeurs en radiothérapie, visant à l'optimisation de la distribution de la dose sur la cible et à l'exclusion, dans la mesure du possible, de l'irradiation des tissus sains avoisinants. Le développement de nouvelles modalités de traitement, telle l'utilisation des hadrons, est le reflet du développement de cette science. Aux confins de cette radiophysique se trouve la radiobiologie, et l'ensemble des connaissances dans ces deux domaines permet une optimisation de la prescription médicale.

MOTS-CLÉS : Ionisation - Le Gray - Radiobiologie - Radiophysique - Radiothérapie

RADIATION PHYSICS FOR BEGINNERS

SUMMARY : The clinical development of ionizing irradiation, both in the fields of medical imaging and radiotherapy treatment, is the result of a comprehensive understanding of the basics of radiation physics. This has led to major innovations in the field of radiotherapy. Those innovations aim at a better dose distribution i.e. hitting the target while leaving healthy tissues as much as possible outside of the high-dose region. New techniques such as treatment with heavy ions are the reflections of the continuous evolution of science and knowledge in the field. At the boundaries of radiation physics, we are reaching the field of radiation biology. The combination of knowledge issued from both scientific fields does offer a unique opportunity for treatment optimization.

KEYWORDS : Gray unit - Ionization - Radiation biology - Radiation physics - Radiotherapy

INTRODUCTION

La découverte des rayons X, par W. Roentgen en 1895, puis celle de la radioactivité (rayons gamma issus de sources naturelles), par H. Becquerel en 1896, ont rapidement suscité l'intérêt pour les applications médicales des rayonnements ionisants et ce, à des fins diagnostiques et thérapeutiques. La radiothérapie était née. Ses premiers développements, au début du XX^{ème} siècle, visant à détruire des cellules cancéreuses ou tout autre tissu «pathologique», ont rapidement confronté les cliniciens (pas encore appelés radiothérapeutes) aux problèmes de la tolérance des tissus sains avoisinants. Si les effets bénéfiques des rayonnements ionisants ont été décrits et sont aujourd'hui clairement établis, leur nocivité reste préoccupante. Les développements, tant au niveau technique que clinique, font alors l'objet de nombreux débats entre physiciens et médecins (1-4). Les deux s'accordent pour aboutir à la conclusion que, pour soigner efficacement des patients, la radiothérapie doit être sélective, ciblée et basée sur des mesures exactes de la dose délivrée.

LA DOSE ? QUELLE DOSE ET DE QUOI S'AGIT-IL EXACTEMENT ?

LA DOSE EN RADIOTHÉRAPIE

La notion de «dose» est indissociablement liée à l'utilisation de rayonnements dits «ionisants». Ces rayonnements ionisants ont le pouvoir de déposer une quantité d'énergie dans les milieux (la matière) où ils pénètrent. Ainsi, ces 3 concepts, rayonnements ionisants, énergie déposée et milieu sont fondamentaux pour la définition et la compréhension de la dose.

Le dépôt dans le milieu de l'énergie transportée par le rayonnement incident s'effectue par les mécanismes d'excitation et d'ionisation des atomes et molécules. L'ionisation des atomes consiste en l'arrachement d'un ou plusieurs électrons du cortège électronique de ces atomes. Il faut, pour cela, qu'ils reçoivent une énergie au moins égale à l'énergie de liaison des électrons au noyau. Les atomes et molécules ionisées ne sont, dès lors, plus électriquement neutres et leurs propriétés au sein de la matière en deviennent modifiées. Lors de l'excitation, l'énergie reçue par les atomes est trop faible pour rompre la liaison d'un électron avec le noyau, et l'énergie absorbée par l'atome le place dans un état instable, dit «excité», mais qui ne modifie pas ses propriétés chimiques. Les ionisations sont à l'origine des effets utilisés pour la détection des rayonnements ainsi

(1) Responsable du secteur Physique et Informatique, Département de Physique Médicale, CHU de Liège.

(2) Professeur, Université de Liège, Chef de Service, Service de Radiothérapie, CHU de Liège.

qu'à l'origine des effets biologiques constatés sur les milieux vivants.

La dose absorbée par le milieu est une grandeur physique mesurable dont l'unité légale est le «Gray» et qui correspond à une énergie de 1 Joule dans une masse de matière d'1 kg. Cette grandeur est valable quelle que soit la nature du rayonnement et celle de la matière absorbante. La radiothérapie utilise cette unité, le Gray, pour prescrire la dose à délivrer au volume cible.

L'énergie existe sous des formes très variées, susceptibles de se convertir les unes dans les autres. L'évolution historique de leur découverte a conduit les physiciens à créer différentes unités pour mesurer l'énergie. Dans le cas qui nous occupe, et pour comprendre la signification d'une dose en radiothérapie, le Gray équivaut à 1 Joule par kg. Il y a lieu de convertir cette dose absorbée en énergie de liaison des électrons aux atomes qui s'exprime en électron-Volt (eV), puisqu'il s'agit là de l'énergie requise pour l'ionisation. La correspondance entre les 2 unités est de 1 Joule = $6,241 \cdot 10^{18}$ eV. Les énergies de liaison des atomes constitutifs de la matière vivante varient d'une dizaine d'eV (13,6 eV pour l'atome d'hydrogène) jusqu'à plusieurs milliers pour la couche K la plus proche du noyau de l'atome de calcium, par exemple. Dans un milieu aqueux, on observe que l'énergie moyenne d'ionisation est égale à 32 eV. Une dose de 1 Gray absorbée dans un noyau cellulaire de masse 10^{-10} g produit environ 20.000 ionisations dont 2.000 affecteront la molécule d'ADN, cible biologique des radiations ionisantes.

LES RAYONNEMENTS IONISANTS - QUE SONT-ILS ET COMMENT IONISENT-ILS ?

Les rayonnements rencontrés en médecine et en biologie sont constitués soit de particules matérielles chargées négativement (électrons), positivement (protons) ou neutres (neutrons), soit par un rayonnement électromagnétique (électriquement neutre) d'énergie proportionnelle à la fréquence du rayonnement transportée par l'intermédiaire des photons (= quanta d'énergie sans support matériel, électriquement neutre, sans existence au repos, d'énergie exclusivement cinétique, notion introduite par Einstein).

On parlera de rayonnement directement ionisant s'il est constitué de particules chargées provoquant l'éjection directe de l'électron du cortège atomique par l'interaction de leur champ électrique, et de rayonnement indirectement ionisant constitué de particules non

chargées dont l'énergie est d'abord absorbée (interaction primaire), en tout ou en partie, par l'atome provoquant l'éjection d'une ou plusieurs particules secondaires chargées (électron ou positron) induisant elles-mêmes nombre d'ionisations (interactions secondaires) dans le milieu bien souvent à distance du site de l'interaction primaire.

On l'a compris, la dose exprime le nombre d'ionisations produites par unité de masse de matière traversée par les rayonnements. Ces rayonnements ne sont pas égaux entre eux quant à leur pouvoir d'ionisation. Selon la nature du rayonnement, la répartition microscopique des ionisations est très différente et l'on distingue souvent les rayonnements par leur pouvoir de Transfert Linéique d'Énergie (TLE) qui est le rapport de l'énergie déposée dans un volume d'intérêt et de la longueur moyenne de trajectoire de la particule ionisante. Les ionisations produites au sein de la cellule seront réparties différemment selon le TLE du rayonnement. A titre d'exemple, 4 particules alpha (noyau d'hélium chargé de 2 protons) sont suffisantes pour induire 20.000 ionisations. Par contre, il faudra 1.000 particules à TLE faible pour obtenir ce même niveau d'ionisation.

LA DOSE EN RADIOPROTECTION

Afin d'évaluer les effets nocifs des radiations ionisantes chez l'homme (anomalies génétiques, induction de pathologies cancéreuses,...), une grandeur physique spécifique a été créée, le «Sievert», basée sur la dose absorbée, tout en prenant en compte les caractéristiques des rayonnements pouvant produire ces complications tardives ainsi que la vulnérabilité des tissus irradiés.

La dose efficace utilisée en radioprotection, exprimée en Sievert, est le résultat du produit de la dose absorbée, exprimée en Gray, du facteur de pondération qui est lié à la nature du rayonnement (W_r) et du facteur tissulaire (W_t), selon la formule : Dose efficace (Sievert) = Dose absorbée (Gray) x W_r x W_t . Ainsi, sans aller dans les détails, la législation prévoit que la dose maximale annuelle pour les professionnels de la santé exposés aux radiations ionisantes ne dépassera pas 20 mSv (milliSieverts) par douze mois consécutifs. Dans le tableau I, on observe que des rayonnements à particules (protons, neutrons et particules alpha) ont un facteur de pondération élevé.

TABLEAU I. FACTEURS INFLUENÇANT LA DOSE EFFICACE UTILISÉE EN RADIOPROTECTION

Nature du rayonnement	Facteur W_r	Nature tissulaire	Facteur W_t ICRP 2007
Photons (toutes énergies)	1	Moëlle osseuse	0,12
Electrons	1	Poumon	0,12
Protons	5	Gonades	0,08
Neutrons (selon l'énergie)	5 à 20	Sein	0,08
Particules alpha et noyaux lourds	20	Thyroïde	0,04

CONCLUSION

Le Gray, grandeur physique de la dose absorbée, utilisée en radiothérapie pour prescrire la dose de traitement, est insuffisant pour évaluer les effets biologiques qui résulteront d'une irradiation. En effet, à dose absorbée égale (dose physique), les effets biologiques varient en fonction d'un certain nombre de facteurs dont la nature du rayonnement, la radiosensibilité des tissus, le débit de dose et son fractionnement ainsi que la distribution spatiale du dépôt de dose dans le volume cible. Pour rendre compte de l'impact de ces facteurs, il faut, aux confins de la physique, passer le flambeau à la biologie et introduire le coefficient biologique d'efficacité relative (EBR). Il est principalement utilisé en radiobiologie pour apprécier l'efficacité d'un rayonnement à produire un effet biologique précis et il est essentiellement fonction du TLE de la radiation.

A ce stade, la radiobiologie prend le relais des considérations de dosimétrie physique (1-4). Le but final de l'exercice est d'établir la prescription médicale la plus adaptée à la nature tissulaire à traiter et ce, en fonction des différents types de rayonnements et techniques d'irradiation disponibles.

BIBLIOGRAPHIE

1. The 2007 Recommendations of International Commission on Radiological Protection. *ICRP, 2007d*.
2. Steel G.— Basic clinical radiobiology 2nd edition. *New York, Arnold, 1997*.
3. Galle P, Paulin R.— Biophysique, Radiobiologie, Radiopathologie. *Paris, Masson, 1997*.
4. Dutreix J, Desgrez A, Bok B, et al.— Biophysique des radiations et imagerie médicale. *Paris, Masson, 1993*.

Les demandes de tirés à part sont à adresser au Dr E. Lenaerts, Service de Radiothérapie, CHU de Liège, Belgique.
Email : eric.lenaerts@chu.ulg.ac.be