

15,1 – Radioactivité et physique nucléaire, introduction

1 Rayons X¹

Wilhelm Conrad Röntgen avait 55 ans en 1895 et il était un professeur de physique respecté à Würzburg. Il aimait être seul et conduisait sa recherche tranquillement, presque discrètement, au point que ses étudiants le surnommaient *der Unzugangliche*, l'inabordable. Il s'intéressa au travail de Hertz et Lenard sur les rayons cathodiques, surtout l'étude de ce dernier sur le passage des rayons par un trou percé dans une feuille d'aluminium vers l'extérieur du tube dans l'air. Lenard avait entouré son appareil avec du plomb et du fer pour l'isoler de la lumière et du champ électrique. Röntgen recouvrit aussi le tube, mais par chance il n'utilisa qu'un carton noir et mince. Dans la salle obscure, il remarqua que l'un de ses écrans luminescents (un morceau de papier enduit d'un sel de baryum), à une certaine distance, brillait sans raison apparente. étonné, il explora le phénomène jusqu'à ce qu'il fût convaincu qu'il était réel. Au bout d'un moment, la cause lui parut claire : le tube à décharge émettait un nouveau rayonnement invisible et pénétrant. Il l'appela **rayons X**, parce que *x* représente en mathématiques un inconnu.

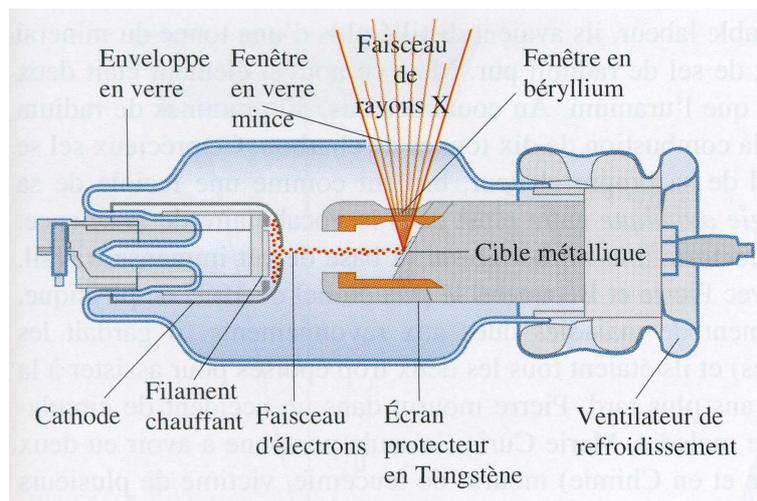


FIGURE1 – Un tube moderne de rayons X : Un faisceau d'électrons entre en collision avec une cible métallique et produit des rayons X.

Les pellicules photographiques sont sensibles aux rayons X, comme à la lumière ordinaire. Ainsi grâce à leur grand pouvoir de pénétration, les rayons X sont capables de produire des « photos...des ombres des os de la main ». Bien qu'ils puissent ioniser l'air, comme la lumière ordinaire, ces rayons ne sont pas déviés par un champ électrique ou un champ magnétique. Pour établir que ces rayons étaient des ondes et non des particules, Röntgen essaya sans succès d'observer leur réfraction, leur réflexion spéculaire et leur polarisation. J.J. Thomson et d'autres privilégièrent l'interprétation correcte des rayons X : un *rayonnement électromagnétique de très courte longueur d'onde* ($\lambda = 0,1 \text{ nm}$). La nature ondulatoire des rayons X n'était acceptée que petit à petit, lorsqu'en 1906 C. Barkla réussit à obtenir leur polarisation partielle, établissant ainsi leur nature transversale. Restait à déterminer leur longueur d'onde²...

1. *Physique*, Eugene Hecht.

2. La question de la longueur d'onde des rayons X fut réglée en 1912 par le physicien allemand Max von Laue.



FIGURE2 – Le tableau de Van Dyck, *Sainte Rosalie intercédant en faveur de Palerme frappée par la peste*, vue à la lumière réfléchi et aux rayons X transmis. Les rayons X qui passent à travers la peinture pour atteindre la plaque photographique placée derrière le tableau révèlent ce qui est masqué par la couche superficielle.



Questions

1. Que sont les « les rayons cathodiques » ?
2. Pourquoi l'auteur écrit-il : « ...par chance il n'utilisa qu'un carton noir et mince ... » ?
3. Quelle est la nature des rayons X ?
4. L'auteur indique que les rayons X peuvent « ioniser l'air ». Comparer la valeur de l'énergie qu'un rayon X transporte à celle que la lumière visible transporte.
À partir de la valeur de la longueur d'onde des rayons X donnée dans le texte, calculer la valeur de cette énergie.
5. Pourquoi les rayons X ont-ils « un grand pouvoir de pénétration » ?

2 Découverte de la radioactivité³

La découverte par hasard des rayons X par Röntgen mit en ébullition une bonne partie de la communauté scientifique. En France, Henri Becquerel reprit les travaux de son père sur les substances fluorescentes. Celles-ci absorbent et réémettent de la lumière; la peinture vert pâle sur les aiguilles d'une montre en est un exemple. L'émission des rayons X fut découverte grâce à la luminescence d'une région du tube de Crookes frappée par les rayons cathodiques et Becquerel se demanda si ses matières fluorescentes pouvaient émettre des rayons X. Par hasard, il commença à travailler avec l'un des composés de son père, un sulfate mixte d'uranium et de potassium, qui est un sel d'uranium. Exposé à la lumière solaire, ce sel émettait effectivement des rayonnements qui pouvaient pénétrer l'épais papier d'emballage d'une plaque photographique et impressionner la pellicule.

3. *Physique*, Eugene Hecht.

Un jour sans soleil de l'hiver de 1896, Becquerel plaça le composé fluorescent au-dessus d'une plaque photographique emballée comme d'habitude mais, cette fois il les rangea dans l'obscurité dans un tiroir en attendant des jours ensoleillés. Au bout de quelques jours, mu par une inspiration soudaine et comme il était méticuleux, il développa la pellicule. À son grand étonnement, il découvrit que le sel d'uranium l'avait impressionnée car on voyait l'empreinte de l'échantillon. Apparemment l'exposition préalable du sel à la lumière solaire n'était pas nécessaire à l'émission du rayonnement et celle-ci n'avait pas de lien avec la fluorescence. Il venait de découvrir par hasard ce que Madame Curie appellera plus tard la **radioactivité**, la propriété qu'ont certaines substances d'émettre spontanément des radiations pénétrantes.

Becquerel étudia la radiation et consigna plusieurs de ses propriétés (dont quelques-unes qui se révélèrent fausses), en particulier, la propriété de décharger un électroscope chargé. En 1897, il est retourné à d'autres sujets d'étude. Contrairement aux rayons X, ces nouvelles émanations ne pouvaient produire ces passionnantes images des os et elles furent en général accueillies avec indifférence. Cette désaffection dura environ un an et demi avant que le problème ne soit repris par une jeune étudiante, à la Sorbonne, au talent prometteur et qui recherchait un sujet pour sa thèse de doctorat, Marie (Manya) Sklodovska Curie. Elle accepta le défi et commença le travail de sa vie.

Marie Curie trouva que le thorium, comme l'uranium, était radioactifs. Avec son époux, Pierre, elle découvrit un élément qui était environ 400 fois plus actif que l'uranium ; ils l'appelèrent le polonium (du nom du pays d'origine de Marie, la Pologne). Personne ne savait à l'époque que le rayonnement était essentiellement la projection de débris du noyau d'un atome instable qui se rajustait spontanément. Malgré cela, Marie fut la première à rapporter en 1898 que la « radioactivité est une propriété atomique ». Travaillant pendant 45 mois dans des conditions affreuses, dans un hangar en bois abandonné et humide, les Curie réussirent enfin à isoler un autre élément radioactif : *le radium*.

Au bout de quatre ans d'incroyable labeur, ils avaient distillé plus d'une tonne de minerai d'uranium pour en extraire 1g de sel de radium pur. Mais ce nouvel élément était deux millions de fois plus radioactif que l'uranium. Au cours des ans, 30 grammes de radium dégagent la même énergie que la combustion de dix tonnes de charbon. Ce précieux sel se consume tranquillement, chaud de sa propre chaleur, brillant comme une luciole de sa propre lumière. Le terme énergie atomique entra ainsi dans le vocabulaire de la science.

Marie soutint sa thèse de doctorat à la Sorbonne sur la base de cet immense travail. Six mois plus tard, elle reçut avec Pierre et Becquerel le prix Nobel de 1903 de physique. Pierre souffrait déjà probablement de maladies dues aux rayonnements (il gardait les fioles de radium dans ses poches) et ils étaient tous les deux trop épuisés pour assister à la cérémonie à Stockholm. Trois ans plus tard, Pierre mourut dans un accident de circulation. En 1934, après une longue maladie, Marie Curie (la seule personne à avoir eu deux fois le prix Nobel : en Physique et en Chimie) mourut de leucémie, victime de plusieurs années d'excessive exposition aux rayonnements. Mêmes les pages de son cahier de laboratoire furent trouvées contaminées avec des empreintes digitales radioactives.



Questions

1. Qu'est-ce qu'une substance fluorescente ?
2. Quelle est l'hypothèse de départ du travail de Henri Becquerel ? Cette hypothèse s'est-elle avérée être exacte (justifier la réponse) ?
3. Les plaques photographiques de Henri Becquerel ont-elles été impressionnées par des rayons X ?
4. Qu'est-ce qui est projeté lors d'un phénomène radioactif ?
5. Sous quelle forme est dégagée « l'énergie atomique » ?

3 Alpha, Bêta et Gamma

Ernest Rutherford avait 24 ans quand il arriva au Laboratoire Cavendish en 1895. Il commença à étudier les « rayons de Becquerel » et il trouva qu'ils étaient « complexes, et qu'il y en avait au moins deux types distincts : l'une, qui est très facilement absorbée, sera appelée, simplement, **rayonnement alpha**, α , et l'autre, plus pénétrante, **rayonnement bêta**, β ». Un peu plus tôt, Sir William Ramsay avait découvert l'hélium dans un minerai contenant de l'uranium et

déterminé, avec F. Soddy, qu'il était libéré par le radium. Ainsi, il y avait déjà un lien entre les rayons α et l'hélium. (*Une particule alpha est le noyau de l'hélium, soit l'association de deux protons et deux neutrons, mais cela ne sera établi que plusieurs années plus tard*).

En 1903, Rutherford réussit à faire dévier des rayons α en utilisant des champs électriques et magnétiques intenses, « prouvant » ainsi que c'était des particules chargées positivement. Les mesures du rapport de la charge à la masse des particules α donnèrent une valeur plusieurs milliers de fois plus faible que celui de l'électron, révélant une grande masse. Travaillant avec un jeune assistant, Hans Geiger (connu pour son compteur), Rutherford conclut que les particules α ont une charge de $+2e$, deux fois la charge fondamentale positive (charge de l'ion d'hydrogène).

En 1908, Rutherford et Royds capturèrent des particules α dans une belle expérience. Le radon gazeux, émetteur de particules α , était recueilli au-dessus du mercure dans un tube mince. Au bout d'une semaine, les particules α , qui étaient passées dans la région vide au-dessus du mercure, furent poussées à travers un tube capillaire, soulevant le niveau du mercure. En excitant électriquement le gaz accumulé, les deux chercheurs trouvèrent qu'il avait le spectre d'émission caractéristique de l'hélium. La notion d'atome n'était pas encore clairement définie, mais « *la particule α , après avoir perdu sa charge positive [en gagnant deux électrons orbitaux], devint un atome d'hélium* ». *La particule alpha est donc le noyau de l'atome d'hélium*.

Le travail sur les rayons β progressa rapidement dans plusieurs laboratoires européens : on trouva qu'ils étaient déviés par le champ magnétique (1899). Ils ont une charge négative (1900), ils ont un rapport de charge à la masse très proche de celui des rayons cathodiques (1900) et enfin ils ont la même masse que l'électron (1902). *Les rayons bêta sont donc des électrons*.

P. Villard étudia à Paris les émissions du radium et il nota en 1900 la présence de rayons très pénétrants. Ils n'étaient pas déviés par un champ magnétique intense, révélant ainsi une analogie avec la lumière. On acquit progressivement la conviction que ce **rayonnement gamma**, γ , était électromagnétique ; plus énergétique et de longueur d'onde plus courte que les rayons X, mais à part cela, de nature identique. La question fut complètement réglée en 1914, lorsque Rutherford et Andrade réussirent à observer la réflexion des rayons γ sur la surface d'un cristal.

Les photons des rayons gamma (d'énergie allant de $0,01 \text{ MeV}^4$ à 10 MeV) sont *hautement pénétrants*. Ils peuvent traverser plusieurs mètres de béton ou environ un à cinq centimètres de plomb avant d'être complètement absorbés. Ils sont plus puissants (et plus dangereux) que les rayons X, car ils peuvent facilement traverser le corps humain et détruire les molécules sur leur chemin. Les rayons bêta (de $0,025 \text{ MeV}$ à $3,2 \text{ MeV}$), dont la vitesse varie entre $0,30c$ et $0,99c$, peuvent traverser environ 15 m d'air et 1 mm d'aluminium avant d'être totalement arrêtés ; ils ne pénètrent pas très profondément dans le corps humain (de 1 mm à 2 cm environ). Ils sont donc de loin moins pénétrants que les rayons γ mais environ 100 fois plus pénétrants que les rayons α .

Les particules alpha (de 4 MeV à 10 MeV) ont une masse de $6,642 \times 10^{-27} \text{ kg}$, environ 7300 fois la masse de l'électron. Elles sont émises par les noyaux atomiques et elles peuvent avoir de grandes vitesses ($1,4 \times 10^7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ à $2,2 \times 10^7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) ; les α du radium, par exemple, ont une vitesse de $1,519 \times 10^7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Elles sont facilement absorbées ; une seule feuille de papier ou $0,3 \text{ cm}$ à $8,6 \text{ cm}$ d'air suffisent pour les arrêter complètement. Mais si l'on respire de l'air contenant une poussière radioactive, les particules alpha entrent dans les poumons, où elles peuvent être assez dangereuses. Elles sont très ionisantes (1000 fois plus que les rayons β). Une particule α de 5 MeV peut créer 40 000 paires d'ions en traversant 1 cm d'air sec. Par conséquent, les particules alpha perdent rapidement leur énergie et sont très nuisibles aux organismes vivants (elles peuvent causer 20 fois plus de dégâts que les rayonnements bêta et gamma). Seules les particules alpha très énergétiques ($> 7,5 \text{ MeV}$) peuvent traverser la peau humaine et en général, le rayonnement extérieur n'est pas un problème...



Questions

1. Qu'est-ce qu'une particule alpha α ?
2. En déduire pourquoi il est normal qu'une particule alpha possède une charge électrique égale à $+2e$.

4. $1 \text{ MeV} = 1 \times 10^6 \text{ eV}$

3. Quelle propriété, vue en cours cette année, a permis de déterminer qu'une particule alpha est liée à l'élément hélium ?
4. Qu'est-ce qu'une particule bêta β^a ?
5. Décrire la méthodologie utilisée par les chercheurs lorsqu'ils essaient d'identifier une particule inconnue. Illustrer le raisonnement à partir de l'exemple des particules β .
6. Quelle est la nature du rayonnement γ ?
7. Déterminer la longueur d'onde d'un rayon *gamma* d'énergie 0,01 MeV.
8. Classer par ordre de pouvoir de pénétration croissant les particules α , β et le rayonnement γ^b .
Relever quelques valeurs caractéristiques.

a. Nous verrons en cours que, de nos jours, on sait qu'il existe deux types de particules bêta : β^+ et β^- . Les particules bêta dont il est question ici sont les particules β^- .

b. Ce site pourra être consulté avec profit : <http://www.cea.fr/jeunes/themes/la-radioactivite/l-homme-et-les-rayonnements>

4 Dommages des rayonnements : dosimétrie

Lorsque des rayonnements énergétiques (des ions positifs, électrons, positrons, neutrons et photons) traversent la matière, ils peuvent produire plusieurs effets qui la transforment. Si l'exposition est suffisante, c'est-à-dire si une grande quantité d'énergie est déposée, des liaisons interatomiques sont brisées et des atomes littéralement déplacés ; les métaux deviennent cassants, les cellules vivantes meurent, les plastiques se décomposent et les semi-conducteurs se détériorent. Bien sûr, ce même pouvoir de destruction peut être exploité pour traiter le cancer, stériliser la nourriture, introduire des mutations biologiques utiles et produire des lunettes de soleil qui s'obscurcissent automatiquement.

L'ionisation des atomes et des molécules est l'un des effets parmi les plus importants des rayonnements sur les systèmes biologiques. Un électron atomique dans le nuage entourant le noyau peut être arraché, laissant derrière lui un ion positif. Quand cet électron est ensuite capturé par un autre atome, un ion négatif est créé. La présence de ces paires d'ions dans les cellules vivantes peut modifier la chimie normale de la cellule et avoir des effets très destructeurs, dont le cancer.

La **dosimétrie** traite la définition et la mesure des « quantités » de rayonnement, ce qu'on appelle la *dose* délivrée à un système. Il y a quatre mesures distinctes de rayonnements qui doivent être considérées : *l'activité d'une source*, qui détermine la quantité de rayonnements produite à l'endroit d'origine, *l'exposition*, qui est la quantité de rayonnements reçue par le système étudié, *la dose absorbée*, qui détermine l'énergie livrée réellement au système par le rayonnement incident et *la dose biologiquement équivalente*, qui détermine l'effet de la dose physique sur un système biologique particulier.

L'exposition est définie spécifiquement pour les photons (rayons X ou γ) d'énergie allant jusqu'à 3 MeV. Elle est liée à la *quantité d'ionisation produite dans un kilogramme d'air sec aux conditions normales de température et de pression*. L'unité la plus utilisée est le *roentgen* (R), qui correspond à la production d'un certain nombre spécifique de paires d'ionisation ou, ce qui est équivalent, à la séparation d'un certain nombre de coulombs de charge négative et positive par kilogramme : $1 \text{ R} = 2,58 \times 10^{-4} \text{ C} \cdot \text{kg}^{-1}$. Une telle mesure définit l'intensité ionisante du rayonnement X ou γ incident. Mais elle ne dit rien sur le système spécifique exposé au rayonnement, qui peut être totalement transparent à ce rayonnement.

La dose absorbée reflète la quantité d'énergie délivrée au système par l'absorption du rayonnement ionisant incident. Si un faisceau de photons de 1 roentgen tombe sur un tissu biologique souple, une énergie d'à peu près 0,01 J est absorbée par chaque kilogramme du corps. [...] Par conséquent, nous définissons le *rad* (acronyme pour l'expression anglaise « radiation absorbed dose », c'est-à-dire la dose de rayonnement absorbé) par : $1 \text{ rad} = 0,01 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$. C'est probablement l'unité la plus utilisée pour la dose absorbée, bien que le *gray* (Gy) soit officiellement l'unité du SI : $1 \text{ Gy} = 100 \text{ rad} = 1 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$. Le roentgen est utilisé seulement pour les photons, tandis que le rad et le gray sont utilisés pour tous les rayonnements.

Rayonnement	FQ
Photons	1
Particules bêta (> 30 keV)	1
Particules bêta (< 30 keV)	2
Protons (1 – 10 MeV)	2
Neutrons (< 0,02 MeV)	3 – 5
Neutrons rapides (1 – 10 MeV)	10(corps) – 20(yeux)
Protons (1 – 10 MeV)	10(corps) – 20(yeux)
Particules α	10 – 20
Ions lourds	jusqu'à 20

TABLE1 – Facteur de qualité (FQ) de quelques rayonnements.

Les différents types de rayonnement n'ont pas le même effet sur un système biologique particulier (cellule, tissu, organe ou organisme), il n'est pas donc suffisant de spécifier simplement la dose absorbée en rads. Par exemple, les neutrons énergétiques sont surtout nuisibles en causant la cataracte (opacité du cristallin de l'œil qui peut causer la cécité). Ainsi, 1 rad de neutrons inflige le même dommage que 10 rads de rayons X. Cela est dû au fait que l'ionisation causée par les neutrons rapides est concentrée le long de leur trajectoire, ce qui produit des modifications plus sérieuses dans le tissu.

Pour tenir compte de ces différences dans l'*efficacité biologique relative* des divers rayonnements, on introduit un facteur multiplicatif appelé **facteur de qualité** (FQ). Le dommage de chaque forme de rayonnement (qui dépend aussi de son énergie et des caractéristiques de la cible) est comparé à celui des photons de 200 keV, pris comme étalon de référence. Le résultat est présenté dans le tableau 1. La **dose biologiquement équivalente** est définie comme le produit de la dose absorbée (en rads) par le FQ; l'unité correspondante est le *rem*⁵ (acronyme pour l'expression anglaise *roentgen equivalent man* c'est-à-dire l'équivalent en roentgens pour l'homme). **Un rem de quelque rayonnement que ce soit produit plus ou moins les mêmes dommages biologiques** que ceux de 1 rad de photons de 200 keV. Donc 1 rad de photons de 200 keV (FQ = 1) correspond à 1 rem et produit les mêmes dommages de cataracte que 0,05 rad de neutrons rapides (FQ = 20), qui correspondent aussi à 1 rem.

On estime qu'une personne reçoit en moyenne une dose annuelle de rayonnements de toutes sortes d'environ 0,40 rem (voir le tableau 2). Cela comprend environ 0,13 rem par an provenant du milieu naturel (rayons cosmiques, radioactivité de l'environnement immédiat des roches, des briques, du sol, de la nourriture, de la fumée des cigarettes,

5. L'unité officielle du SI est le *sievert*, égal à 100 rems. 1 gray de photons de 200 keV (FQ = 1) correspond à 1 sievert.

Source	Pourcentage
<i>Activité humaine</i>	<i>Total : 18 %</i>
Rayons X médicaux et dentaires	11
Médecine nucléaire	4
Produits de consommation	3
Environnement professionnel	0,3
Retombées radioactives	< 0,3
Combustibles nucléaires	0,1
Divers	0,1
<i>Sources naturelles</i>	<i>Total : 82 %</i>
Radon	55
Émission interne du corps	11
Minéraux terrestres	8
Rayons Cosmiques	8

TABLE2 – Sources de rayonnement ionisants (aux États-Unis).

etc.) et 0,07 rem par an dus aux rayons X médicaux (radiographie). Un scanner peut délivrer jusqu'à 15 rem, dans les cas graves nécessitant une exposition prolongée.

Espèce	DL _{50/30}
Chien	350
Souris	400 – 600
Singe	600
Homme	500 – 700
Rat	600 – 1000
Grenouille	700
Triton	3000
Escargot	8000 – 20 000
Virus	> 100 000

TABLE3 – Sensibilité de certains organismes aux rayonnements.

L'homme et les animaux n'ont pas tous la même sensibilité aux rayonnements. Celle-ci est habituellement spécifiée par une quantité représentée symboliquement par DL_{50/30} (la dose létale unique absorbée uniformément par tout le corps et qui produit la mort de 50 % des individus sur une période de 30 jours après l'absorption); il est en effet peu probable qu'un être vivant, qui survit 30 jours, meure peu après. Le tableau 3 donne le DL_{50/30} pour plusieurs espèces animales. La probabilité de la mort et le temps nécessaire dépendent tous les deux de la dose. On désigne par TSM, le temps de survie moyen après une exposition de tout le corps. Pour les humains, une exposition de tout le corps à une dose voisine de 100 rem cause généralement des maladies bénignes dues au rayonnement (voir le Tableau 4). Les quelques décès qui surviennent ont lieu au bout d'un TSM de 15 jours environ. Si la dose augmente, le TSM reste presque constant, mais la probabilité de décès augmente progressivement. Une dose de 250 rem entraîne une grave maladie. Une dose de 500 rem est mortelle dans 50 % des cas (avec un TSM qui est encore de 15 jours). Tous ces cas sont dus à des dommages produits dans la moelle osseuse. Si la dose augmente encore, le TSM diminue jusqu'à un autre plateau de trois ou quatre jours pour une dose de 1000 rem. La mort survient alors dans presque 100 % des cas non traités et elle est due à des dommages gastro-intestinaux, qui se manifestent plus rapidement que la détérioration de la moelle osseuse. Avec des doses dépassant environ 10 000 rem, le TSM devient quelques heures et la mort résulte de la destruction du système nerveux central. Dans le cas de doses encore plus élevées, la mort survient presque instantanément par destruction directe des molécules vitales.

Dose (en rem)	Effet
0 – 10	Aucun effet observable à court terme.
10 – 100	Légers changements sanguins (diminution des globules blancs). Stérilité temporaire (à partir de 35 rem pour les femmes et 50 rem pour les hommes).
100 – 200	Réduction significative des plaquettes sanguines et des globules blancs (temporaire). Nausée, vomissement.
200 – 500	Grave détérioration du sang, nausée, vomissement, hémorragie, perte des cheveux, mort dans beaucoup de cas.
500 – 2000	Dysfonctionnement de l'intestin grêle et de la circulation sanguine. Mort en moins de deux mois dans la plupart des cas, mais survie possible si traitement.

TABLE4 – Effets immédiats de l'exposition de tout le corps au rayonnement (pour des adultes).

Questions

1. Quel est l'effet des rayonnements énergétiques sur la matière ?
2. Qu'appelle-t-on activité d'une source ?
3. Quelles différences existent entre l'exposition, la dose absorbée et la dose biologiquement équivalente ?

4. Lorsque le facteur de qualité d'un rayonnement augmente, l'exposition tolérable à ce rayonnement augmente-t-elle ou diminue-t-elle ?