

Interactions rayonnements-matière

I.1. Définition

On appelle interaction rayons matières tous phénomènes se produisant lorsqu'un rayonnement traverse la matière telle qu'il soit. Ce rayonnement est dit ionisant s'il possède une énergie suffisant pour arracher un ou plusieurs électrons aux atomes ou aux molécules qu'il traverse. Les rayonnements sont produit par divers types de sources d'exposition, parmi lesquelles les sources radioactives [3].

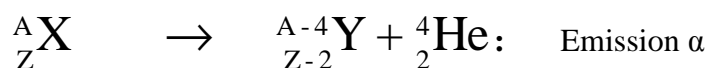
I.1.1. Sources radioactives

Les noyaux de certains atomes peuvent se désintégrer, c'est-à-dire passé d'un état instable à un état stable en libérant une ou plusieurs particules accompagné d'un rayonnement. Au cours de cette transmutation, l'énergie interne d'un noyau ne peut varier que de manière discontinue. Il en résulte que la valeur de l'énergie associée à l'émission des particules ne peut être que l'une des valeurs d'une série bien déterminée, dépendant de la composition du noyau et de son état initial. Cette énergie est de l'ordre de quelques millions d'électron-volts ($1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-13} \text{ J}$) [4].

Les sources radioactives peuvent émettre trois types de rayonnements: deux rayonnements de particules chargées (les rayonnements alpha et bêta) et un rayonnement électromagnétique (le rayonnement gamma).

❖ Le rayonnement alpha (α)

Le rayonnement α est émis au cours de la désintégration des noyaux lourds ($Z \geq 80$). Ces noyaux ont un excédent en nucléons et ont tendance à se désintégrer en émettant des particules α (noyaux d'hélium). La désintégration α est soumise à des forces nucléaires fortes caractéristiques des noyaux lourds. L'équation de désintégration α est:



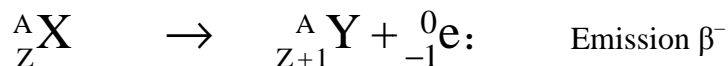
Lors d'une désintégration alpha, une particule alpha est éjectée à très grande vitesse (environ 20 000 km/s) hors du noyau qui se désintègre. Cette particule est composée de deux protons et de deux neutrons. Le rayonnement α a une portée de quelques centimètres dans l'air et ne pénètre que de quelques fractions de millimètres dans le corps humain. Les particules α ne sont pas dangereuses pour la santé sauf s'ils sont inhalées ou ingérées.

❖ Le rayonnement bêta moins (β^-)

La radioactivité β^- affecte les nucléides présentant un excès de neutrons. Elle se manifeste lors des réactions isobariques par la transformation dans le noyau d'un neutron en proton avec émission d'un électron et d'un anti neutrino: $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$.

En fait, le neutron n'est pas une particule élémentaire mais il est composé d'un quark up et de deux quarks down (udd). C'est un de ses quarks down qui interagit, en se transformant en quark up, formant alors un proton (uud) par effet des forces nucléaires faibles. Lors de la désintégration β^- , l'énergie libérée est partagée entre le proton, l'électron et l'anti neutrino. Ainsi le rayonnement β^- n'est pas mono énergétique mais possède un spectre continu d'énergie variant de $E=0$ à $E=E_{\max}$. Le proton issu de la désintégration β^- reste confiné dans le noyau alors que l'électron et l'anti neutrino sont éjectés. L'électron éjecté, a une grande vitesse de sorte que les formules relativistes sont nécessaires pour tout calcul relatif à cette électron.

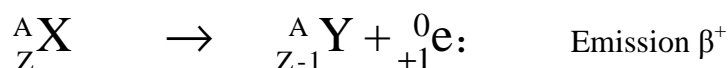
Lors de la désintégration β^- , le nombre de masse du noyau demeure constant mais le nombre de charge augmente d'une unité suivant l'équation:



❖ Le rayonnement bêta plus (β^+)

La radioactivité β^+ est observée sur les noyaux qui possèdent un excès de protons. Elle se manifeste par la transformation dans le noyau d'un proton en neutron, le phénomène s'accompagne de l'émission d'un positron et d'un neutrino: $p \rightarrow n + e^+ + \nu_e$.

Comme le neutron, le proton est une particule composite, composée de deux quarks up et d'un quark down (uud). C'est un de ces quarks up qui se transforme en un quark down, formant un neutron (udd). Lors de cette désintégration β^+ , un positron est éjecté du noyau qui se désintègre suivant l'équation:

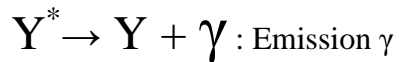


L'émission d'un rayonnement β^+ par un noyau n'est possible que si l'énergie dégagée par le noyau qui se désintègre est supérieure à 1,022 MeV.

Les rayons β sont plus pénétrants mais moins ionisants que les rayons α . Ils ont une portée de quelques mètres dans l'air et ne pénètrent que de quelques millimètres dans le corps humain.

❖ Le rayonnement gamma (γ)

Après une transformation radioactive du noyau, le noyau fils peut être dans un état excité et se désexciter en émettant un rayonnement γ . Le rayonnement gamma se traduit par l'émission d'une onde électromagnétique (photon) de haute énergie sans émission de particule suivant l'équation:



Le rayonnement γ a une forte capacité de pénétration, son parcours dans l'air est de plusieurs centaines de mètres. Le blindage contre les rayons γ requiert des grandes quantités de matières. Par exemple un blindage qui réduit de 50% l'intensité de rayons γ de 1 MeV nécessite 1 cm de Plomb, 6 cm de béton ou 9 cm de terre. Aucune épaisseur de plomb n'arrête à 100% les rayons γ . La formule d'atténuation d'un pourcentage X% (inférieur à 1), correspond à une épaisseur E (en cm), selon la formule: $E = [\ln (1/1-X)]/\mu$ où $\mu=0,693147$ (coefficient d'absorption du plomb, pour les rayons gamma) [3, 5].

Remarque: Le rayonnement X est un rayonnement électromagnétique comme le rayonnement γ . Les rayons X sont produits par des transitions électroniques provoquées en général par la collision d'un électron avec un atome, à haute vitesse. Ils sont comme les rayons γ très pénétrants. Les rayonnements X peuvent être aussi produits de deux manières très spécifiques: la fluorescence et le rayonnement de freinage [3].

I.1.2. Interactions des particules chargées avec la matière

Les particules chargées interagissent essentiellement avec les électrons périphériques des atomes. Ces interactions faisant appel aux forces nucléaires, peuvent conduire à des modifications de la structure du noyau si les particules incidentes ont des énergies suffisantes pour passer au travers du cortège électronique et du champ électrique engendré par le noyau. Par contre si l'énergie de la particule incidente est trop faible, il y'a juste l'excitation ou l'ionisation de l'atome. A chaque interaction, la particule incidente perd de l'énergie par émission d'un rayonnement électromagnétique et est peu à peu ralentie [4].

- Cas des particules alpha

Les particules alpha ont une masse environ 7500 fois supérieure à celle des électrons. Pour les énergies comprises entre 0 à 10 MeV, les pertes d'énergies lors des chocs avec des électrons sont très faibles, et la déviation subie lors d'une collision est petite.

Les particules alpha d'un faisceau parallèle monocinétique se comporter sensiblement de la même manière. Les trajectoires sont rectilignes, et chaque particule est peu à peu freinée

(figure I.1). Dans le cas d'une particule alpha animée initialement d'une énergie cinétique T , dans un milieu M , on peut parler de parcours $R=R(T, M)$ bien défini: c'est la distance de freinage de la particule alpha. Le parcours des particules alpha est très court. Il en résulte une très forte ionisation spécifique.

- Cas des électrons

Deux phénomènes physiques sont essentiellement observés lorsqu'un électron traverse un milieu matériel:

- L'électron incident peut interagir par interaction coulombienne avec des électrons des atomes du milieu traversé, ce qui conduit à l'ionisation ou à l'excitation de ces atomes (collision). Ce processus de collision est nettement prépondérant pour les électrons de faible énergie (inférieure à 1 MeV). La déviation de l'électron entré en collision avec un autre électron peut être importante; il en est de même pour la perte de l'énergie.
- Si l'électron incident passe à proximité d'un noyau atomique, il dévie sous l'effet de la force due au champ électrique des charges du noyau. Il subit une accélération qui provoque l'émission d'un rayonnement électromagnétique: on parle de rayonnement de freinage ou Bremsstrahlung (figure I.3). Le freinage est d'autant plus important que la vitesse de l'électron soit grande.

Les électrons d'un faisceau parallèle monocinétique peuvent se comporter de manière différente les uns des autres comme l'indique la figure (figure I.2).

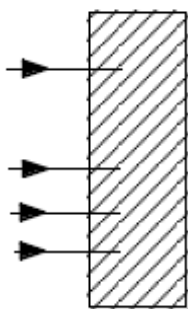


Figure I.1: Parcours des particules alpha

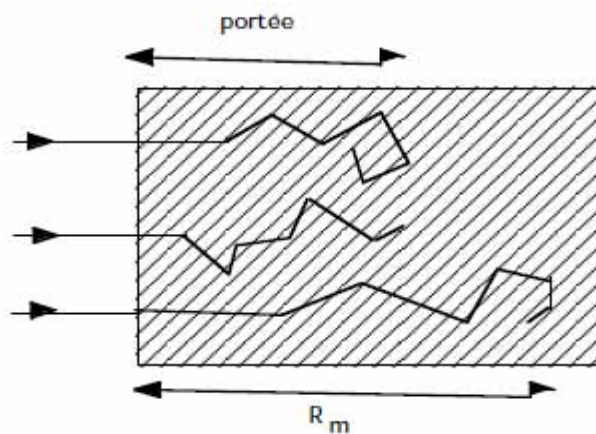


Figure I.2: Parcours des particules bêta

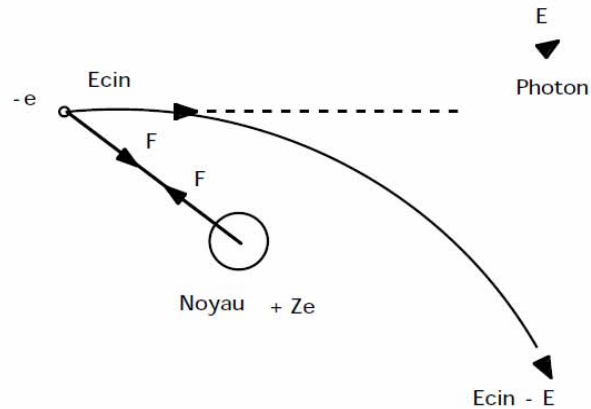


Figure I.3: Rayonnement de freinage ou Bremsstrahlung

I.1.3. Interactions du rayonnement électromagnétique avec la matière

Lorsqu'un faisceau de photon pénètre dans un milieu matériel, on constate une disparition progressive des photons qui le constituent. Cette diminution, appelée atténuation, est due à l'interaction d'un certain nombre de photons avec les particules matérielles du milieu, plus particulièrement les électrons. Le coefficient linéaire d'atténuation $\mu(E, M)$ dépend de l'énergie E des photons et du milieu M traversé mais également de sa densité ρ . On définit alors un coefficient massique d'atténuation μ_m dépendant de la matière mais plus de son état (solide, liquide ou gazeux): $\mu_m = \mu(E, M)/\rho$.

Le photon peut subir essentiellement trois types d'interactions suivants: effet Photo électrique, effet Compton Créations de paires.

▪ Effet photoélectrique

Lorsqu'un photon entre en collision avec les électrons des couches internes d'un atome, on parle d'effet photoélectrique. Dans ce cas la totalité de l'énergie du photon incident E est absorbée par l'atome. Cette énergie est transférée à un électron qui est éjecté de sa couche électronique et emporte l'excédant d'énergie sous forme d'énergie cinétique. Il s'en suit l'émission d'un photon de fluorescence lorsqu'un électron des couches supérieures transite pour occuper la place laissée vacante par l'électron éjecté. Les transitions électroniques vers les couches internes peuvent créer des ionisations supplémentaires. Les électrons éjectés suites à ces ionisations supplémentaires sont appelés électrons Auger.

L'effet photoélectrique ne peut avoir lieu que si l'énergie du photon incident est plus grande que l'énergie de liaison de l'électron E_L .

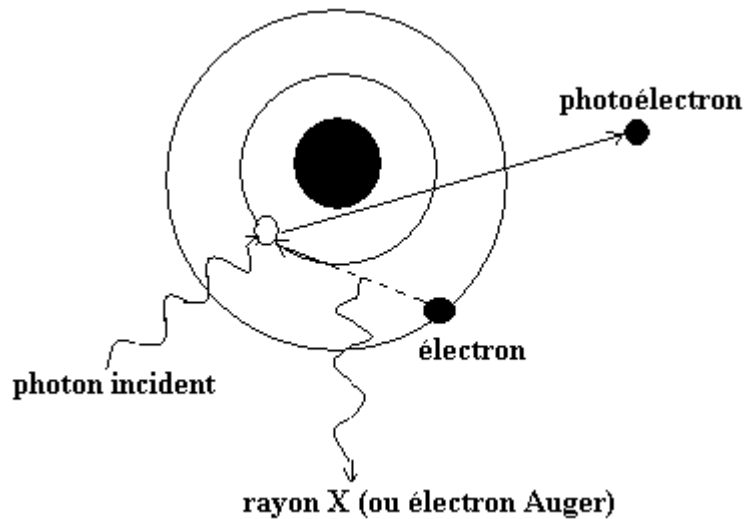


Figure I.4: Effet photoélectrique

▪ Effet Compton

On parle d'effet Compton lorsqu'un photon est diffusé par un électron d'une couche externe de l'atome (électron quasi-libre) auquel il cède une partie de son énergie sous forme d'énergie cinétique (E_C); le reste d'énergie est emporté par un autre photon d'énergie $E' = h\nu'$. Pour des photons de faible énergie (inférieure à 0,5 MeV), la majeure partie de l'énergie est emportée par le photon (diffusion); pour les photons d'énergie plus élevée (supérieurs à 2 MeV), c'est l'électron Compton qui emporte la plus grande partie de l'énergie (absorption). Le photon incident de fréquence ν est diffusé sous un angle θ par rapport à la direction incidente, avec une fréquence ν' inférieure à ν , cette fraction d'énergie perdue est cédée à l'électron, appelé électron Compton, qui dévie d'un angle ϕ par rapport à la direction incidente. Le phénomène cinétique de cet effet Compton est illustré par la figure suivante.

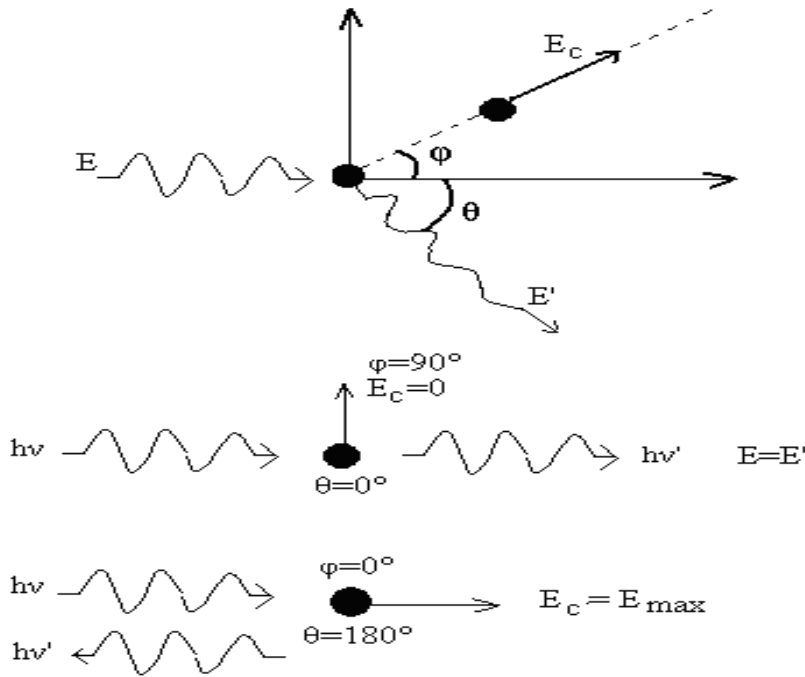


Figure I.5: Effet Compton: cas général et cas extrêmes

En appliquant les lois de conservation de l'énergie et de la quantité de mouvement on obtient les formules concernant l'énergie du photon diffusé et de l'électron de recul.

▪ L'énergie du photon diffusé

L'énergie du photon diffusé $h\nu' = E'$ est donnée par la relation:

$$h\nu' = \frac{h\nu}{1 + \alpha(1 - \cos\theta)}$$

Où :

$$\alpha = \frac{h\nu}{m_0 c^2}$$

$h\nu = E$ est l'énergie du photon incident;

$h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ J.s}$ est la constante de Planck;

$m_0 c^2$ est l'énergie au repos de l'électron.

➤ Pour $\theta = 0^\circ$, l'énergie du photon diffusé est maximale, $E'(max) = E$

➤ pour $\theta = 180^\circ$, l'énergie du photon diffusé est minimale, $E'(min) = \frac{E}{1 + 2\alpha}$ c'est le phénomène de rétrodiffusion.

➤ Lorsque l'énergie du photon incident est très grande ($\alpha \gg 1$), l'énergie du photon

rétrodiffusé tend vers $E' = \frac{m_0 c^2}{2} = 0,225 \text{ MeV}$

■ Energie cinétique de l'électron après la diffusion Compton

L'énergie cinétique de l'électron après la diffusion Compton est donnée par:

$$E_C = h\nu - h\nu' = h\nu \frac{\alpha(1 - \cos\theta)}{1 + \alpha(1 - \cos\theta)}$$

L'énergie de l'électron Compton est maximale pour $\theta = 180^\circ$, c'est-à-dire quand le photon

subit la rétrodiffusion, $E_C(\max) = h\nu \frac{2\alpha}{1 + 2\alpha}$

L'énergie de l'électron Compton est minimale pour $\theta = 0$, $E_C(\min) = 0$

■ Angle de recul φ de l'électron

L'angle de recul φ de l'électron est donné par :

$$\tan\varphi = \frac{\sin\theta}{\frac{\nu}{\nu'} - \cos\theta}$$

Quand θ augmente de 0° à 180° , φ diminue de 90° à 0° : l'électron est toujours projeté vers l'avant tandis que le photon est diffusé dans toutes les directions de l'espace mais avec une direction préférentielle qui dépend de la section efficace de l'effet Compton qui à son tour dépend de l'énergie $h\nu_0$ du photon incident.

■ Effets de production de paires

Lorsqu'un photon d'énergie E passe dans le champ d'une particule chargée et notamment dans celui d'un noyau atomique, il peut totalement disparaître et donner naissance à un couple électron/positron. Pour que cette matérialisation soit possible, il faut que l'énergie E soit supérieure ou égale à 1,02 MeV, énergie correspondant à deux fois l'énergie au repos d'un électron. Le positron s'annihile avec un électron du milieu en donnant naissance à deux photons d'énergie 511 keV, émis à 180° l'un de l'autre.

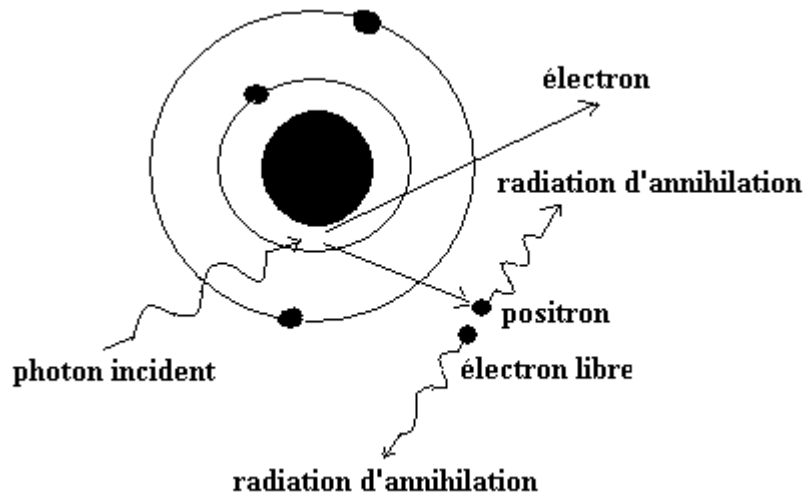


Figure I.6: Effets de production de paires

I.2. Les applications utilisant les radioéléments

I.2.1. Dans le domaine de la santé

Dans le domaine de la santé, l'utilisation des radioéléments sont aujourd'hui d'une grande importance. La radiothérapie, la médecine nucléaire etc.... sont des applications utilisant des RI qui permettent le traitement, le diagnostic ou l'élimination de beaucoup de maladies. La radiothérapie est un des traitements ou d'élimination des cancers par: Irradiation des tumeurs, Irradiation du sang ou Irradiation des tissus. Les services de médecines nucléaires utilisent des radioéléments à des fins de diagnostic. Les radioéléments sont administrés au patient afin d'obtenir une image fonctionnelle d'un tissu ou d'un organe à l'aide d'une caméra à scintillation. Le diagnostic peut être également in vitro, permettant de doser certains composés contenus dans le sang préalablement prélevé sur le patient. Les médicaments radio-pharmaceutiques peuvent constituer un traitement à eux seuls, par exemple I-131 pour le traitement du cancer de la thyroïde. Les isotopes généralement utilisés sont: l'iode 131 (I-131), le samarium 153 (Sm-153), le strontium 90 (Sr-90): émetteurs bêta, le cobalt 60 (Co-60), le césium 137 (Cs-137), iridium 192 (Ir-192): émetteurs gamma ou les rayonnements émis par les accélérateurs de particules [6, 7].

Les radioéléments sont aussi utilisés en biomédecine comme traceur ou marqueur isotopique mais également comme produit pharmaceutique. En Afrique et en Amérique latine, l'hygiène nutritive chez les enfants a améliorée grâce à des méthodes analytiques nucléaires.

I.2.2. Dans le domaine de l'industrie

Comme dans le domaine médical, les radioéléments sont utilisés dans l'industrie pour obtenir des images internes de pièces métalliques, de soudures ou de structures en béton, à des fins de

contrôle, sans les altérer. On peut citer parmi ces applications: La radiographie à rayon γ , la radiographie à rayon X et les techniques de jauges radiométriques. Ces techniques sont utilisées dans les secteurs tels que: la chaudronnerie, la fonderie, l'industrie du pétrole, la construction navale et aéronautique, la cimenterie, l'industrie des semi-conducteur, la fabrication du papier. Les radioéléments couramment utilisés sont l'Iridium 192, le Césium 137, le Cobalt 60 [7, 8].

Les radioéléments sont aussi largement utilisés dans les laboratoires pour des fins de recherche.

I.2.3. Dans le domaine de l'agriculture

L'amélioration durable de la productivité agricole est aujourd'hui un objectif réaliste. Les sciences nucléaires offrent des techniques éprouvées qui peuvent être, et qui sont, utilisées pour améliorer la productivité agricole tout en préservant des ressources naturelles précieuses aujourd'hui et à l'avenir. Selon les estimations de la FAO, jusqu'à 40% des denrées produites dans le monde sont cultivées par irrigation, mais de grandes quantités d'eau utilisées à cette fin sont perdues à cause des fuites dans les systèmes d'irrigation.

L'AIEA par le biais de son programme « Gestion des sols de l'eau et de nutrition végétale » a mis au point une technologie faisant appel à des isotopes stables et radioactifs. Cette étude permet d'accroître le rendement de cultures en éléments nutritifs au profit de la population et du bétail, tout en conservant l'eau et en empêchant les terres marginales de se dégrader davantage. Un projet de coopération technique d'une durée de cinq ans pour l'intensification durable de l'agriculture sur les terres arables les mieux adaptées et la conversion des terres est en cours d'exécution dans les pays sahéliens d'Afrique de l'Ouest (Burkina Faso, Niger, Mali et Sénégal).

Des sources radioactives sont également utilisées pour réduire les populations d'insectes nuisibles. L'une des techniques les plus efficaces qui aient été mises au point à ce jour est celle de l'insecte stérile (TIS). La TIS consiste à élever en masse des insectes mâles, puis à les stériliser par irradiation gamma. Les insectes stérilisés sont identiques aux insectes sauvages, sauf qu'ils ne peuvent pas se reproduire. Ils sont ensuite lâchés sur le terrain, où ils entrent en compétition avec les mâles sauvages. A la longue, des lâchers répétés d'insectes stériles réduiront progressivement, puis finiront par éradiquer ou maintenir sous contrôles les populations d'insectes visées. Cette technique a permis d'éradiquer aujourd'hui la mouche méditerranéenne des fruits du Mexique et du Chili, ainsi que certaines régions du Guatemala et des Etats-Unis. Ce programme est maintenant appliqué en Argentine, dans le sud du Pérou et au Moyen-Orient [9].

Dans le milieu marin, Les spécialistes du milieu étudient la contamination due à des pesticides et à d'autres produits chimiques en analysant des échantillons à l'aide de techniques nucléaires [10].

I.2.4. Dans le domaine de l'énergie

L'énergie nucléaire assure une part importante des besoins des nombreux pays industrialisés, et cela sans émettre des gaz acides et des gaz à effet de serre que, nécessairement, produisent les industries plus traditionnelles.

De nos jours, les réacteurs nucléaires fournissent 13,8% de la production mondiale d'électricité dont 25% de la production des pays de l'OCDE. En 1994, la production électronucléaire a dépassé la production d'électricité de 1958, toutes formes confondues. Toujours selon l'agence de l'OCDE pour l'énergie nucléaire, la production d'électricité d'origine nucléaire dans les pays de l'OCDE devrait continuer à progresser de 0,6% par an jusqu'en 2020. En 1999 la part du nucléaire par rapport aux autres moyens de production d'électricité dans ces pays avait atteint 24,2% et devrait atteindre selon toutes vraisemblances les 25% en 2012 [11].

Ce choix de l'électronucléaire, dans les pays industrialisés est considéré de bonne façon, car il présente des avantages certains en matière de cout et d'environnement, avec des frais d'exploitation en baisse et des facteurs de disponibilité élevés. Les pays qui ont adopté ce système, à l'image de la France, voient des possibilités de développement à long terme et sur une grande échelle. Cependant l'énergie nucléaire reste une pomme de discorde dans certains pays qui à l'image de l'Allemagne et récemment le Japon ont décidé de sortir petit à petit du nucléaire.

En dépit de tous les avantages que nous procurent les sources des RI il est cependant nécessaire de connaître ce que celles-ci revêtent du point de vu destructif notamment leurs effets sur la nature: l'être vivant en particulier.

I.3. Effet des rayonnements ionisants sur les êtres vivant: l'Homme en particulier

Les premiers effets cliniques attribuables aux RI ont été rapportés très tôt après la découverte des rayons X et de la radioactivité à la fin du XIX^{ème} siècle. La première radiolésion a été décrite en 1896, les premiers effets tératogènes en 1901 et le premier cancer humain radio-induit en 1902. La cancérogénèse était démontrée expérimentalement en 1910. La multiplicité de ces conséquences cliniques a ouvert la voie à la radiobiologie, étude des mécanismes aboutissant à ces lésions, afin de les prévenir [12, 13, 14].

Les recherches ont montré que les rayonnements ionisants agissent en transférant de l'énergie à la matière. C'est cet excès d'énergie apporté à la molécule qui est responsable de lésions moléculaires. En effet toutes les molécules des cellules vivantes peuvent être touchées et plus particulièrement l'eau (par son abondance) et l'ADN: Acide désoxyribonucléique (par les conséquences de son altération).

I. 3. 1. La radiolyse de l'eau: sous l'influence des RI, une molécule d'eau se décompose en deux radicaux (H° , OH°) qui sont très réactifs, provoquant des lésions sur les molécules voisines particulièrement l'ADN.

I. 3. 2. Les effets sur l'ADN: la molécule d'ADN est faite d'une double chaîne d'hélices antiparallèles complémentaires. Cette chaîne est constituée de trois éléments qui constituent des nucléotides mono phosphates:

Un groupe phosphate;

Un sucre (le désoxyribose);

Quatre bases azotées Adénine (A), Guanine (G), Cytosine (C), Thymine (T). Ces bases se ressemblent deux à deux: A et G sont des Purines, C et T sont des Pyrimidines.

Les effets des RI sur l'ADN entraînent sa dénaturation, ils sont soit directe: par action des rayonnements sur l'ADN, soit indirecte par effets des radicaux libres produit par la radiolyse de l'eau [15, 16].

- **Effets directs des rayonnements ionisants:** la molécule peut être modifiée par effet direct d'un rayonnement. Cet effet qui consiste en un arrachement d'électron avec formation d'un cation radical, résulte de la création d'ionisations au sein de la molécule d'ADN elle-même, qui surviennent dans les bases ou sur les sucres composant la chaîne d'ADN. Dans le cas des RI de fort Transfert Linéique d'Energie (TLE), l'ionisation directe est dominante et représente 40% du nombre total de lésions générées par l'irradiation [17, 18].
- **Effets indirecte des rayonnements ionisants:** la voie indirecte des RI sur l'ADN est dû au radicaux libres HO° et H° produit par la radiolyse de l'eau. La recombinaison de ces radicaux s'ils se produisent à proximité de la molécule d'ADN, ils vont pouvoir réagir avec elle en altérant sa structure par oxydation ou réduction. Cette voie indirecte est influencée par la présence d'oxygène dans la cellule. S'il existe en grande quantité dans la cellule qui subit l'irradiation, il peut favoriser la formation, à partir de radicaux libres, de l'eau oxygénée (H_2O_2), ainsi que d'autres espèces oxydantes, qui pourront également provoquer par eux-mêmes des lésions de l'ADN. De ce fait, l'oxygène peut amplifier les