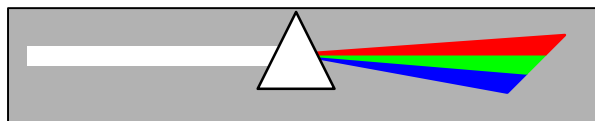




# METHODES SPECTROMETRIQUES D'ANALYSE ET DE CARACTERISATION

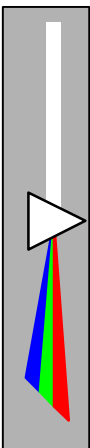


*Techniques spectrométriques*



## SOMMAIRE

<b>1. SPECTROMÉTRIE NUCLÉAIRE ACTIVATION</b>	<b>3</b>
1.1. GÉNÉRALITÉS	3
1.1.1. Historique	3
1.1.2. Le rayonnement électromagnétique	3
1.1.3. Structure des atomes	5
1.1.4. Interactions matière-rayonnement: absorption, émission, fluorescence, diffusion, diffraction	7
1.1.5. Traitement du signal et des données	9
1.2. ETUDE DE LA MÉTHODE	12
1.2.1. Domaines d'application	12
1.2.2. Principe de fonctionnement	19
1.2.3. Description et mise en œuvre des détecteurs usuels	20
1.2.4. Offre commerciale	26
1.2.5. Critères de choix	26
1.2.6. Bibliographie	26
1.3. EFFETS BIOLOGIQUES DES RADIATIONS SUR L'ENVIRONNEMENT ET L'ÊTRE HUMAIN	26
1.3.1. Influence sur l'environnement	26
1.3.1.1. Les différentes sources de rayonnement émises dans l'environnement	26
1.3.1.2. Principes généraux de la radioécologie	27
1.3.1.3. Transfert des radionucléides dans l'environnement	27
1.3.1.4. Transferts des radionucléides dans les chaînes alimentaires terrestres	28
1.3.1.5. Transfert des radionucléides dans les chaînes aquatiques	29
1.3.2. Effets biologiques de la radioactivité sur le corps humain	30
1.3.2.1. L'action des rayons	31
1.3.2.2. Effets médicaux	31
1.4. LA RADIOPROTECTION	32
1.4.1. Protection de l'environnement	33
1.4.1.1. Maîtrise et des conditions de détention et d'utilisation des matériels et installations.	33
1.4.1.2. Le contrôle des rejets radioactifs	34
1.4.2. La radioprotection des personnes.	36
1.4.2.1. Répartition des individus d'une population du point de vue du risque d'exposition	36
1.4.2.2. Limites d'exposition professionnelles	37
1.4.2.3. Délimitation des zones	37
1.4.2.4. Protection contre l'exposition externe	38
1.4.2.5. Protection contre l'exposition interne	39
1.4.2.6. Surveillance individuelle de l'exposition professionnelle	40
1.4.2.7. Surveillance médicale	40
1.4.2.8. Rôle du chef d'établissement	41
1.4.2.9. Les partenaires du chef d'établissement	42



# SPECTROMETRIE GAMMA

## 1. Spectrométrie nucléaire activation

### 1.1. Généralités

#### *1.1.1. Historique*

Ce sont Pierre et Marie Curie qui, les premiers, ont imaginé de doser les éléments par les rayonnements émis par leurs radio-isotopes. Cette méthode permet non seulement de déceler un corps radioactif mais aussi de distinguer les radio-isotopes entre eux car ils diffèrent par la qualité de leur rayonnement et par la durée de leur vie ( cf. Radioactivité Marie Curie 1935).

C'est en utilisant cette nouvelle méthode d'analyse chimique que Pierre et Marie Curie découvrirent le polonium (84) et le radium (88).

La découverte de la radioactivité artificielle par Irène et Frédéric Joliot-Curie permet d'obtenir des isotopes radioactifs de tous les éléments et ainsi d'ouvrir un immense domaine à l'analyse par les isotopes.

L'analyse par radioactivité consiste à créer par une réaction nucléaire (dans notre cas par bombardement de neutrons thermiques) un isotope réactif de l'élément que l'on doit doser. Les premiers dosages effectués par irradiations dans les neutrons ont été faits par Hévésy et Lévi en 1936.

#### *1.1.2. Le rayonnement électromagnétique*

Quand un noyau d'un isotope radioactif se désintègre en donnant un autre noyau stable ou radioactif, il y a un dégagement important d'énergie qui est émise sous forme d'une radiation:

- **radiation  $\alpha$**  : émission d'un  $H^{4++}_2$
- **radiation  $\beta^-$**  : émission d'un  $e^-$
- **radiation  $\beta^+$**  : émission d'un positron
- **rayonnement électromagnétique  $\gamma$ .**

L'émission des rayons est d'origine nucléaire et provient de la réorganisation de l'association des nucléons dans les noyaux excités par l'émission de particules matérielles ( ici des neutrons).



Ainsi, leur énergie sera en général plus grande que celle des rayons  $\gamma$  et elle sera comprise entre quelques dizaines de Kev et quelques millions d'ev (Mev).

Cette énergie est liée à la fréquence de vibration de l'onde électromagnétique et donc à la longueur d'onde par la relation:

$$E = h\nu = hc/\lambda.$$

#### Lois de désintégration des noyaux radioactifs.

Lorsqu'on examine un grand nombre de noyaux radioactifs, le nombre de noyaux se désintégrant pendant un court intervalle de temps est proportionnel au nombre de noyaux présents.

On a :

$$-dN/dt = \lambda N$$

Donc :

$$N(t) = N_0 * e^{-\lambda t}$$

Et :

$$T = (\ln 2)/\lambda \approx 0,693/\lambda$$

avec :

N : nombre de noyaux radioactifs présents à l'instant t.

$N_0$  : constante de proportionnalité.

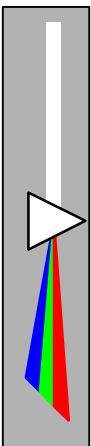
T : demi-vie, temps au bout duquel il ne reste plus que la moitié des noyaux initiaux.

#### Les filiations radioactives.

La désintégration conduit d'un état instable vers un état plus stable mais qui n'est pas toujours le plus stable. A partir de ce nouveau noyau il peut y avoir une nouvelle émission caractérisée par une nouvelle constante radioactive. Il y a ainsi *filiation* depuis le premier noyau instable jusqu'au terme qui est un noyau stable.

#### Sources étalon les plus utilisées.

Sources	Période radioactive	Principales raies (Energie en KeV)
$^{22}\text{Na}$	2,6 années	511,0 - 1274,5
$^{57}\text{Co}$	270 jours	122,1 - 136,4
$^{60}\text{Co}$	5,26 années	1173,2 - 1332,5
$^{137}\text{Cs}$	30,1 années	661,62
$^{152}\text{Eu}$	12,7 années	121,8 - 344,3 - 688,8 778,8 - 964,0 - 1085,8 1112,1 - 1407,9



### Désexcitation gamma.

La présence dans le noyau d'états discrets d'énergie au-dessus de l'état fondamental a été démontrée, notamment par la mise en évidence de la structure fine de l'émission alpha. Tous les autres modes de désexcitation peuvent également conduire à un noyau de filiation à l'état excité. La désexcitation gamma se fait par émission de radiations électromagnétiques, les photons gamma. A chaque niveau d'énergie  $E^*$  correspond une énergie de photon précise  $E^* = h\nu$ , où  $\nu$  est la fréquence du rayonnement électromagnétique.

#### a) Niveau d'énergie.

Les niveaux d'énergie dans l'atome sont mis en évidence par l'émission de rayons X, et leur explication résulte de l'existence d'un champ coulombien central qui assure la stabilité du cortège électronique. Les interactions entre électrons sont faibles et négligeables en première approximation, l'énergie potentielle pour un électron est définie par  $U = -Ze^2/r$ . Au contraire, dans le noyau, les interactions entre nucléons sont fortes et il n'existe pas de potentiel central. Une énergie potentielle négative exprime la liaison du nucléon dans le noyau par les forces nucléaires, où la notion de puits de potentiel. Dans ce puits de potentiel il n'existe qu'un nombre discret de niveaux d'énergie. Lorsque les nucléons occupent les niveaux les plus liés, l'énergie potentielle est la plus basse et le noyau est dans son état d'énergie minimum. Si un ou plusieurs nucléons sont transférés sur des niveaux plus élevés, le noyau est dans un état excité, l'énergie des nucléons est moins négative.

#### b) Nature des rayons gamma. Détection.

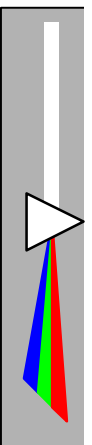
Les rayonnements électromagnétiques observés dans les décroissances radioactives ont une énergie comprise entre quelques keV et quelques MeV. Leur longueur d'onde vaut :

$$\lambda = \frac{c}{\nu} = \frac{hc}{h\nu} = \frac{12,39 \cdot 10^{-11}}{E(\text{MeV})} \text{ cm}$$

Elle est supérieure aux dimensions nucléaires puisque le rayon du noyau est de l'ordre de  $10^{-13}$  cm. Il n'y a aucune différence entre rayons gamma et rayons X, la qualification de rayons exprimant seulement l'idée que leur origine est nucléaire.

Les rayons gamma sont détectés par l'interaction avec les électrons orbitaux: effet photoélectrique, effet Compton, production de paires d'électrons positifs et négatifs lorsque l'énergie dépasse 1,022 MeV. La diffraction cristalline permet les mesures très précises de longueur d'onde, donc d'énergie.

Les compteurs proportionnels permettent la mesure des photons de faible énergie. Les compteurs à scintillations constituent le détecteur courant des rayons gamma. Le détail de la détection sera abordé dans un chapitre ultérieur.



### 1.1.3. Structure des atomes

#### les réactions nucléaires

Au cours d'une réaction nucléaire, une particule  $x$  vient réagir avec un noyau  $N$  d'un atome pour former un nouveau noyau  $P$  et une ou plusieurs particules  $y$ . Cette réaction est très rapide.

Les particules incidentes sont diverses: on compte parmi elles le neutron, le proton, le deuteron, le triton, l'hélium 3, la particule  $\alpha$ , un noyau quelconque et le photon. Lors d'une réaction nucléaire, la quantité de mouvement et l'énergie se conservent. Un noyau étant composé de neutrons et de protons, son énergie se décompose de la manière suivante:

- l'énergie de masse
- l'énergie de liaison nucléaire ou de défaut:  $B$
- l'énergie cinétique du noyau:  $T$ .

On a alors, pour un noyau composé de  $A$  nucléons et  $Z$  protons:

$$E_{\text{total}} = Z \cdot m_p c^2 + (Z-A) \cdot m_n c^2 + B + T$$

avec:

$m_p$  = masse d'un proton;

$m_n$  = masse d'un neutron;

$c$  = vitesse de la lumière.

Une autre particularité des réactions nucléaires est qu'il n'y a en général pas conservation de la masse. Ceci entraîne que l'énergie de défaut de masse varie, provoquant un dégagement de chaleur  $Q$ :

$$Q = B_{\text{final}} - B_{\text{initial}}$$

Si  $Q$  est positif, la réaction est dite exothermique (dégagement de chaleur). Par contre, si  $Q$  est négatif la réaction est endothermique (absorption de chaleur).

Pour amorcer une réaction nucléaire il est nécessaire de fournir à la particule incidente une certaine énergie minimale: celle-ci doit d'abord réussir à s'approcher du noyau; elle doit donc avoir une énergie cinétique supérieure à la barrière coulombienne du noyau ( $E_b$ ). Après s'être approchée, il doit encore lui rester une énergie suffisante qui soit supérieure à l'énergie absorbée par la réaction nucléaire (cette quantité d'énergie est appelée énergie de seuil et notée  $E_s$ ). On a donc:

$$E_{\text{minimum}} = E_b + E_s.$$

1.1.4. Interactions matière-rayonnement:  
absorption, émission, fluorescence, diffusion, diffraction

Les désintégrations.

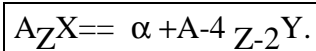
On désigne par isotope d'un élément un atome composé du même nombre de protons mais dont le nombre de neutrons dans le noyau diffère.

Par ailleurs, la radioactivité désigne la faculté qu'ont certains noyaux instables à émettre un rayonnement. On distingue alors la radioactivité naturelle et la radioactivité artificielle: la première se fait par le phénomène de désintégration spontanée des noyaux instables naturels de certains isotopes; ces noyaux radioactifs sont appelés des radio-isotopes. La radioactivité artificielle consiste en l'émission d'un rayonnement par un noyau que l'on aura rendu préalablement instable grâce à une réaction nucléaire ayant créé un radio-isotope. Plusieurs phénomènes caractérisent le radio-isotope:

- La période radioactive: c'est le temps T au bout duquel il ne reste que la moitié des noyaux radioactifs initiaux.
- la loi de désintégration qui donne en fonction du temps le nombre de noyaux radioactifs restants. L'unité de radioactivité est le Curie (Ci): 1 Curie est égal à la quantité de matière dont le nombre de désintégrations par seconde vaut à  $3,7 \cdot 10^{10}$ .

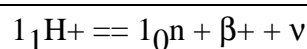
Il existe différents types de désintégrations nucléaires. En général, un noyau radioactif va chercher à se stabiliser en modifiant le nombre de ses protons ou neutrons ou des deux à la fois. S'il se retrouve en état excité, il va émettre de l'énergie sous forme de rayonnement électromagnétique. Les différentes désintégrations sont les suivantes:

- les désintégrations de type  $\alpha$ : elles donnent lieu à l'émission d'une particule  $\alpha$  ( $\text{He}^4_2$ ).



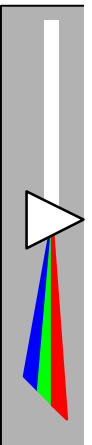
Ce sont surtout les noyaux lourds ( $Z > 82$ ) qui donnent ce type de désintégration. Si, après une telle réaction, le noyau est encore en état excité, ce noyau se désexcite pour retrouver son état fondamental en émettant des photons (ou rayons gamma); ceux-ci sont caractéristiques du noyau car les niveaux excités d'un noyau sont quantifiés.

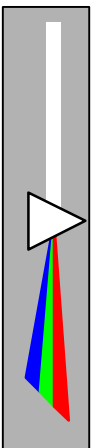
- les désintégrations de type  $\beta^+$ : elles se passent lorsqu'il y a un excès de protons dans le noyau.



et le spectre est continu.

- la capture électronique: elle peut aussi se passer lorsqu'il y a un excès de proton dans le noyau; un électron de la couche K est capté par le noyau. Il





est alors remplacé par un électron de la couche L moins lié. Il s'en suit alors l'émission d'un rayonnement électromagnétique tel que  $h\nu = E_K - E_L$ . Ce réarrangement peut ensuite se poursuivre.

Ce phénomène se produit lorsque la barrière coulombienne empêche l'émission d'un positron  $\beta^+$ .

#### Les absorptions.

- absorption de particules  $\alpha$ : ces particules perdent simultanément et de façon continue leur énergie cinétique en la cédant par petites fractions aux électrons des atomes qui se trouvent sur leur trajectoire. Ceux-ci se retrouvent alors dans un état excité ou ionisé. En se désexcitant, ils peuvent donner lieu à l'émission d'un ou plusieurs photons gamma. Les particules  $\alpha$  étant très lourdes, elles ne sont pas déviées et leur trajectoire est rectiligne.
- absorption de positron  $\beta^+$ : celui-ci, lors d'un choc avec un électron au repos, émet 2 photons gamma, d'énergie 511keV chacun, à  $180^\circ$  l'un de l'autre. Les positrons sont donc arrêtés les uns après les autres en cédant toute leur énergie cinétique aux électrons des atomes qui sont sur leur passage. Les particules  $\beta^+$ , plus légères que les particules  $\alpha$ , sont déviées à chaque ionisation et pénètrent mieux dans la matière que ces dernières.
- absorption des photons gamma: il existe plusieurs phénomènes:
  - \* l'effet photoélectrique: les photons peu énergétiques disparaissent en cédant leur énergie à un électron d'un atome; celui-ci acquiert alors une énergie cinétique égale à la différence entre l'énergie du photon incident et l'énergie de liaison de l'électron.
  - \* la diffusion Compton: les photons plus énergétiques cèdent une partie de leur énergie à un électron par choc élastique
  - \* la création de paires: sous l'influence d'un noyau voisin, les photons très énergétiques ( $E$  très supérieur à 1MeV) disparaissent par matérialisation d'une paire électron-positron dont les énergies cinétiques sont telles que:

$$E(\gamma_i) = E_c(e^-) + E_c(\beta^+) + 2mc^2.$$

Le positron, une fois ralenti par collision, s'annihile avec un électron pratiquement au repos par émission de 2 photons gamma de même énergie 511keV et à  $180^\circ$  (absorption classique d'un positron).

Remarque : pour les 2 premiers effets, l'intensité du faisceau ( donc leur nombre ) diminue progressivement sans perte d'énergie des photons .

Loi d'absorption:

$$I = I_0 \exp(-x)$$

avec:

$I$  = nombre de photons ayant traversé une épaisseur  $x$  de matière ou une masse d'écran de  $m$  grammes par  $cm^2$ .

$I_0$  = nombre initial de photons du faisceau = coefficient global d'absorption linéaire.

total = (photon) + (paire) + (Compton).

### 1.1.5. Traitement du signal et des données

#### Conduite d'une analyse

L'analyse se conduit en trois phases :

- Irradiation de l'échantillon et éventuellement des étalons.
- Mesure proprement dite.
- Traitement des données.

**1. L'irradiation** est réalisée dans un centre spécialisé et habilité ( CEA, réacteur nucléaire, accélérateur de particules du type cyclotron... ). Il s'agit de bombarder les **échantillons** et éventuellement les **étalons** ( poudre de roche, papier imbibé d'un produit, métaux ... ) de **neutrons ou de particules chargées** pendant une période donnée afin de provoquer une réaction nucléaire et de produire ainsi des radio-isotopes. Le temps d'exposition est fonction du type d'**isotopes** que l'on veut créer, généralement il est de l'ordre de quelques minutes. L'échantillon est alors **radioactif**. Il est alors référencé, c'est à dire qu'on indique :

- le temps d'exposition
- l'intensité du flux de neutrons
- la date d'exposition

Il peut alors être retourné au laboratoire désirant effectuer l'analyse.

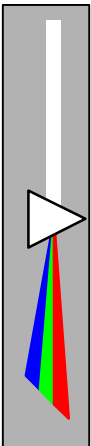
**2.** Les laboratoires effectuant **l'analyse** doivent être agréés par la commission interministérielle de radioéléments artificiels. Il faut prendre des précautions lors de la manipulation de l'échantillon, c'est pourquoi il est enrobé d'une feuille d'aluminium. Cette feuille protège de la **contamination radioactive** ( contact physique avec un corps irradié ) les personnes manipulant et l'appareil de mesure car l'aluminium a une période radioactive très courte.

Avant de déposer l'échantillon dans le spectromètre, on change la feuille d'aluminium qui pourrait contenir des traces d'éléments radioactifs susceptibles de fausser la mesure.

L'échantillon est placé dans une enceinte de plomb, au sommet de la cellule de détection, il est ainsi isolé des rayonnements extérieurs ( radioactivité naturelle essentiellement ). L'échantillon reste dans son enveloppe d'aluminium.

La mesure débute. Les photons sont comptés et classés par ordre d'énergie. L'ordinateur affiche les résultats sur un graphique comportant : en abscisse, l'énergie, et en





ordonnée, le nombre de photons répertoriés. On obtient alors un **spectre d'énergie** constitué de différentes raies spectrales.

En principe, il est possible de **caractériser les éléments** par leurs raies spectrales et leur période radioactive. L'ordinateur dispose d'une banque de données qui lui permet de donner des indications sur la probabilité de présence d'un élément. On peut mener deux types d'analyses :

- **Analyse qualitative** : Des tables donnent, pour les différents **isotopes**, leur **période radioactive**, les principales **raies spectrales** ainsi que le type de rayonnement. Lorsqu'on a identifié un **pic**, on dispose d'une gamme énergétique. On cherche dans la littérature les éléments qui ont leur raie principale dans ce domaine. On dispose alors en général d'un nombre d'isotopes possibles relativement restreint ( de 1 à 10 ).

On peut alors **éliminer** de la sélection **ceux dont la période radioactive est négligeable face à l'âge de l'échantillon** ( on entend par âge, le temps qui s'est écoulé depuis l'irradiation ), ces radio-isotopes n'étant plus présents dans l'échantillon en quantité significative.

Enfin, on peut rechercher les **raies secondaires** des radio-isotopes restant dans le spectre. Lorsqu'on trouve dans le relevé expérimental les raies primaires et secondaires d'un élément, il est identifié avec une **bonne certitude**.

Si des doutes subsistent, on a recours à une deuxième, voire plusieurs mesures qui permettent d'étudier la **décroissance des pics** et donc la **période radioactive** des radioéléments qu'ils caractérisent. En associant spectre et période, il est possible d'identifier les constituants de l'échantillon d'une manière **quasi certaine**.

- **Analyse quantitative**: Elle est précédée de l'analyse qualitative. On doit avoir réalisé l'irradiation de **l'échantillon et d'un étalon** de l'élément à identifier simultanément. L'étalon et l'échantillon doivent avoir la même géométrie.

Appelons  $t_m$  la durée de la mesure.

Si la durée de la mesure est négligeable face à la période radioactive de l'isotope à identifier, on peut considérer que sa radioactivité à la date  $t$  ( date de la mesure ) que multiplie  $t_m$  est proportionnelle à l'aire des pics ( c'est à dire que  $A(t) \cdot t_m = k \cdot (\text{Aire du pic})$  ). Sinon, l'intégrale sur le temps de mesure de  $A(t)$  ( voir formule ci-après ) est proportionnelle à l'aire des pics, soit :

$$\int_t^{t+t_m} A(t) dt = k \cdot (\text{aire du pic})$$

L'activité dépend du temps selon la formule :

$$A(t)=A(T_0)\exp(-\lambda t)$$

avec :

t le temps

$A_0$  la radioactivité pour  $t=T_0$

$\lambda = \ln(2)/T$

T la période radioactive.

En connaissant l'âge de l'échantillon et la durée de l'acquisition des données ( $t_m$ ), on est en mesure de calculer  $A(T_0)$  pour l'échantillon et l'étalon.

On dispose alors de

$$A_{\text{échantillon}}(T_0)=A_1 \text{ et de } A_{\text{étalon}}(T_0)=A_2.$$

Soient  $N_1^*$  et  $N_2^*$  les nombres d'atomes radioactifs présents respectivement dans l'échantillon et l'étalon à la date  $T_0$ . On a la relation suivante :

$$N_1^*/A_1 = N_2^*/A_2.$$

Grâce à la notion de **section efficace** d'un élément définie par ailleurs on est en mesure de démontrer que

$$N_2/N_1=N_2^*/N_1^*= A_2/A_1$$

Connaissant  $N_2$ , on peut déterminer  $N_1$ , nombre d'atomes d'un élément présents dans l'échantillon, on a bien **dosé l'élément N de l'échantillon**.

### Mise en forme et traitement du signal

Une fois la détection réalisée, il est nécessaire de faire intervenir la statistique. Il faut prendre en compte les **imprécisions dues aux détecteurs**: en effet chaque fois qu'une impulsion est enregistrée, il s'ensuit un temps mort plus ou moins long (de l'ordre de la nanoseconde) selon l'énergie du photon reçu. De plus lorsque deux photons arrivent en même temps sur le détecteur, celui-ci enregistre la somme des énergies des deux photons incidents.

C'est donc ce spectre "brut" qui est enregistré par le logiciel et qui sera traité par la suite. Le spectre obtenu doit être analysé qualitativement: on détermine à partir des "pics" du spectre les éléments constituant l'échantillon. Puis, par échantillonnage, une approche quantitative pourra être effectuée.

Il est par conséquent nécessaire de traiter efficacement le signal. Pour cela le logiciel doit éliminer les perturbations d'ordre physique ( bruit de fond, émission d'ondes bêta) et doit analyser les raies restantes.

**Le fond Compton** est un phénomène que l'on retrouve sur tous les spectres. Il est dû à l'échappement partiel de rayons gamma diffusés par "effet compton". Ce phénomène réduit beaucoup la sensibilité de l'analyse. Le traitement de cette perturbation se fait par



soustraction: on met en anti-coïncidence deux détecteurs dont l'un est sensible à tout le spectre et l'autre ne détecte que les photons du fond compton (Anthracène ou plastique).

De plus on note souvent la présence de pics à des énergies de 510KeV, 1020KeV, ou, lorsqu'on a un pic d'énergie  $E_g$ , à  $E_g-510\text{KeV}$ ,  $E_g-1020\text{KeV}$ , etc. Le premier phénomène est dû à **l'émission de photons bêta** par le radio-isotope, le second à **la création de paires** (matérialisation d'un positron et d'un électron).

Plusieurs problèmes vont alors se présenter lors de l'analyse des pics. Il y a d'abord une indétermination au niveau de l'énergie lue par le logiciel sous le pic. On risque d'avoir à faire un choix entre plusieurs éléments ayant **des énergies d'excitation voisines**. On arrive souvent à lever cette indétermination en cherchant les raies secondaires de ces éléments sur le spectre.

Enfin dans le cas où deux **pics sont trop rapprochés**, le traitement par ordinateur est réalisé par simulation des pics jusqu'à ce que leur association donne un profil semblable à celui de la courbe réelle.

## 1.2. Etude de la méthode

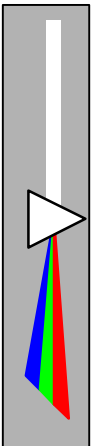
### 1.2.1. Domaines d'application

- l'analyse par radioactivation

*Le domaine d'application idéal de l'analyse par radioactivation par neutrons thermiques est le dosage d'impuretés ou d'éléments traces présents en faible ou très faible concentration dans un matériau.*

*Cependant on pourra également faire appel à cette méthode pour mesurer des concentrations moyennes d'impuretés dans le cas où l'on ne dispose pas de méthodes d'analyse classiques, telle la spectrométrie ou autre.*

*De plus, comme nous allons le voir, le dosage de certains éléments est plus facile à réaliser par radioactivation, même pour des teneurs élevées.*



Les principaux domaines concernés par la radioactivation sont les suivants :

- |                     |                  |                 |
|---------------------|------------------|-----------------|
| - la métallurgie    | - la minéralogie | - la chimie     |
| - la géologie       | - l'électronique | - la pollution  |
| - le génie atomique | - l'expertise    | - la catalyse   |
| - l'environnement   | - les textiles   | - l'archéologie |
| - la biologie       |                  |                 |

### Principe :

Il s'agit de déterminer la quantité d'un élément présente dans un échantillon en mesurant les rayonnements gamma induits dans cet échantillon par une irradiation à l'aide de **neutrons thermiques**.

Un radio-isotope créé par le bombardement neutronique d'un élément peut se reconnaître de deux façons complémentaires :

- par l'**énergie** des gammas qu'il émet
- par sa **période de décroissance**.

Il est alors possible de déduire quel élément a pu s'activer en donnant un tel radio-isotope à l'aide d'une table d'isotopes.

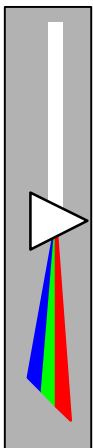
Après irradiation de l'échantillon, on examine donc le spectre gamma des rayonnements émis, et soit on repère le ou les pics correspondant à l'impureté recherchée si on en recherche une en particulier, soit on essaie de retrouver les éléments correspondant aux différents pics observés si on fait une recherche générale.

### Analyse qualitative :

A chaque pic photoélectrique correspond une énergie (en abscisse) sur le spectre gamma. Comme ces énergies sont caractéristiques des radio-isotopes à l'origine de ces rayonnements, on peut retrouver l'élément en question en se référant aux tables d'isotopes. Toutefois, plusieurs radio-isotopes peuvent avoir une énergie gamma égale ou très proche, ce qui ne permet pas de trancher.

On observe alors leur période de décroissance, qu'on peut déterminer en prenant le spectre d'énergie à intervalles réguliers et en traçant la courbe de décroissance de l'activité sous le photopic. Ceci permet en général de conclure quant à la nature des différents éléments présents dans l'échantillon.





### Analyse quantitative :

Pour déterminer la quantité des différents éléments présents dans l'échantillon (et préalablement déterminés), il est préférable de réaliser des mesures relatives, en utilisant un **étalon** contenant le même élément à doser mais dans une proportion connue. A cet effet, il faut que l'échantillon et l'étalon présentent des propriétés similaires : ils doivent être de même forme et de mêmes dimensions, être respectivement irradiés et comptés pendant des temps égaux (ou alors il faut s'y ramener), être homogènes et se présenter dans des positions reproductibles... **L'activité normalisée** et la masse de l'élément à doser étant proportionnelles, une "simple règle de trois" suffit alors pour déterminer la quantité de l'élément en question présente dans l'échantillon, puisque tout est connu ou calculé en dehors de la masse de l'élément à doser dans l'échantillon.

### Avantages et inconvénients :

L'inconvénient majeur est lié à la radioactivité : en effet, ceci nécessite des installations particulières, mais aussi des autorisations administratives. Il s'agit d'une méthode lourde à mettre en oeuvre : elle est rarement employée dans l'industrie, mais est plutôt réservée aux laboratoires de recherche.

L'un des avantages les plus importants de l'analyse par activation est l'absence quasi totale de *blanc* (valeur apportée par les manipulations et les réactifs qui s'ajoute à celle de l'élément à doser dans l'échantillon). En effet, le dosage étant basé sur une mesure de radioactivité induite par irradiation, les manipulations effectuées après irradiation n'apportent que des contaminations non radioactives, donc non mesurables. Cette qualité est très appréciable, surtout dans le cas des dosages de très faibles traces.

Un autre avantage est la limite de détection très basse (quelques fractions de ppm), en général fonction du seul bruit de fond du système de mesure. D'autre part, l'analyse par activation présente une grande sécurité en ce qui concerne l'exactitude (il est relativement facile d'éviter les erreurs systématiques), mais aussi au niveau de la reproductibilité. En outre, elle permet une analyse rapide (si tous les éléments nécessaires sont réunis sur place), et est non destructive, ce qui présente un grand intérêt dans certains cas.

### Pour en savoir plus ...

- A détailler :*
- neutrons thermiques
  - énergie et période : caractéristique du RI ; pourquoi?
  - spectre gamma : détermination énergie - période
  - étalons
  - activité normalisée - "règle de trois"
  - éventuellement : correction des bruits et parasites

### Les neutrons thermiques :

Les neutrons, grâce à leur masse et à leur absence de charge, constituent les projectiles les plus commodes et les plus utilisés pour rendre radioactifs les noyaux de la plupart des éléments. Ils peuvent réagir avec les isotopes constituant un échantillon selon une ou plusieurs des réactions suivantes :  $(n, \gamma)$ ,  $(n, p)$ ,  $(n, \alpha)$ ,  $(n, n')$ ,  $(n, 2n)$ ...

Etant données les dimensions du noyau par rapport à celles de l'atome, la probabilité pour une particule de rencontrer un noyau est faible. On la représente par une grandeur  $\sigma$ , appelée section efficace :  $\sigma = (\text{nombre de réactions par noyau}) / (\text{nombre de particules incidentes par unité de surface})$ . Il s'agit donc d'une surface, qui s'exprime généralement en barn ( $1 \text{ barn} = 10^{-24} \text{ cm}^2$ ).

A chaque type de réaction correspond ainsi une section efficace qui dépend du noyau bombardé, mais aussi de la nature et de l'énergie des particules incidentes utilisées : il est donc possible de favoriser telle ou telle réaction en sélectionnant l'énergie des neutrons incidents. En règle générale, les réactions  $(n, \gamma)$  ont lieu principalement avec les neutrons thermiques, c'est-à-dire ceux dont l'énergie est inférieure à 0,5 MeV, alors que les autres réactions ne se produisent guère qu'avec les neutrons rapides, d'énergie supérieure à 0,5 MeV.

Il est important de pouvoir réaliser cette sélection de réaction. On pourrait se dire qu'il est inutile de prendre ces précautions, puisque seuls les rayonnements gamma seront détectés par les mesures effectuées en spectrométrie gamma. Le problème est que d'autres réactions peuvent provoquer indirectement l'émission de rayonnements gamma : en effet, un élément A peut donner naissance à un isotope radioactif d'un autre élément B, celui-ci pouvant ensuite se stabiliser en émettant des rayons gamma. La mesure par spectrométrie gamma permettra de reconnaître le radio-isotope de B à l'origine de ce rayonnement, mais pas à l'élément A initial. Si la première réaction se produit de façon importante, l'interprétation des résultats sera alors inévitablement fautive si on se contente de réaliser une analyse par spectrométrie gamma.

Tout ceci explique pourquoi ce sont les neutrons thermiques qui sont utilisés en spectrométrie gamma : ils provoquent la création d'isotopes radioactifs émettant directement des rayonnements gamma, tout en évitant l'apparition de rayonnements parasites pouvant fausser les résultats.

### L'activité normalisée :

Lorsqu'on cherche à doser un élément, on veut pouvoir déterminer l'activité normalisée d'un élément, car c'est elle qui permettra de réaliser l'analyse quantitative et donc de conclure. En effet, les activités normalisées et les masses de l'élément à doser sont proportionnelles, donc :

$$m_{\text{éch}} = m_{\text{ét}} * N_{\text{éch}} / N_{\text{ét}}$$

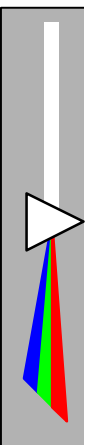
Ce qui permet d'obtenir la teneur de l'élément :

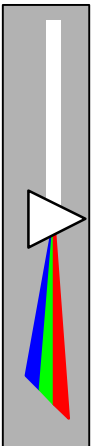
$$\tau_{\text{éch}} = m_{\text{éch}} / M_{\text{éch}}$$

avec :

$M_{\text{éch}}$  masse totale de l'échantillon.

On distingue trois activités pouvant être déduites l'une de l'autre :





- l'activité sous pic P : c'est le nombre de coups comptés sous le photopic;
- l'activité caractéristique K : c'est la partie de l'activité sous pic qui est due uniquement à l'élément à doser;
- l'activité normalisée N : c'est l'activité caractéristique rapportée à des conditions bien définies d'irradiation et de comptage, de façon à ce qu'on puisse comparer deux activités, même si elles ont été obtenues dans des conditions différentes.

Pour calculer l'activité caractéristique, il faut soustraire à l'activité sous pic le bruit de fond, le fond Compton des pics plus énergétiques, ainsi que les interférences éventuelles. Enfin, le calcul de l'activité normalisée se fait à partir de l'activité caractéristique, mais elle dépend des conditions d'irradiation. Par exemple, lorsque seuls les flux diffèrent :  $N = K / \phi$ , où  $\phi$  est le flux moyen de neutrons à travers l'échantillon.

#### Etalons:

Des étalons sont nécessaires pour faire des mesures relatives. Ils doivent être de même forme et de mêmes dimensions que les échantillons. On peut les classer en deux catégories:

- Etalons externes.

Il est commode de fabriquer, pour chacun des éléments susceptibles d'être dosés par activation, une série d'étalons contenant des quantités croissantes de l'élément. Les conditions à respecter pour les fabriquer sont les suivantes:

\* Le corps contenant l'élément doit être de grande pureté; se méfier des corps hygroscopiques, des pollutions de surface, des contaminations lors de manipulations, de l'oxydation à l'air...

\* La pesée doit être suffisamment précise; attention aux corps hygroscopiques, à l'évaporation dans le cas des liquides...

\* Si l'élément se présente sous la forme d'un composé chimique, les autres éléments auxquels il est lié doivent s'activer le moins possible (choisir des liaisons par ex. avec C, H, O, Ca...), et la formule de composition doit être parfaitement définie,

\* Le corps contenant l'élément doit être soit un solide homogène, soit un liquide ou une poudre qui doit alors être parfaitement dispersée dans tout le volume du P.E. (comme pour les échantillons); cette deuxième solution permet de fabriquer commodément, à partir du même corps, toute une série d'étalons qui sont bien protégés à l'intérieur des P.E.

Afin de limiter les corrections de temps mort dû au R.I. utilisé pour le dosage, on a intérêt à encadrer la valeur de  $m_{ech}$  par deux étalons contenant des masses voisines de  $m_{ech}$ , l'une supérieure l'autre inférieure, ce qui permet de faire une interpolation linéaire.

Etalons internes.

Ceux-ci sont fabriqués en ajoutant à l'échantillon lui-même des quantités croissantes de l'élément à doser. Il faut donc les préparer pour chaque analyse. L'étalon devant être mélangé de façon homogène avec l'échantillon, ils doivent être tous deux sous forme de poudres ou de liquides enfermés dans des P.E.(porte-échantillon). Par ailleurs le choix de l'étalon doit être fait avec autant d'attention que pour les étalons externes.

La valeur de la masse de l'élément à doser contenue dans l'échantillon est alors obtenue par extrapolation vers zéro de la droite d'étalonnage. Les activités doivent être rapportées à un même poids d'échantillon pour l'échantillon proprement dit et pour les différents étalons internes.

Le grand avantage de ces étalons internes est d'éliminer les effets de matrice, c'est-à-dire les différences entre échantillons et étalons en ce qui concerne l'effet d'ombre, l'auto-absorption et le temps mort dû aux autres R.I. que celui qui est utilisé pour le dosage.

### Détermination de l'énergie et de la période des R.I.:

- *Introduction:*

Un R.I. peut se reconnaître en spectrométrie gamma par:

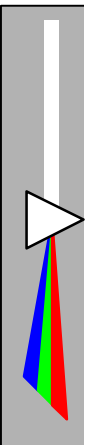
- \* l'énergie des gamma qu'il émet.
- \* sa période de décroissance.

Ces deux caractéristiques permettent, grâce à des tables, de déterminer les R.I. et ainsi, connaissant l'énergie des neutrons utilisés, on pourra déterminer quel est l'élément qui correspond à ces R.I.

Les tables de données supposent que l'on connaisse par avance la composition de l'échantillon, mais lors d'une véritable analyse qualitative on ignore totalement cette composition. Pour avoir le maximum de renseignements sur celle-ci, il faut créer dans l'échantillon le maximum de R.I. sans qu'ils soient pourtant tous présents en même temps. Il est donc utile de faire varier les conditions d'irradiations en jouant:

- \* sur le temps d'irradiation: un temps court favorise les périodes courtes, un temps long les périodes longues .
- \* sur l'énergie des neutrons, qui influence les réactions induites.
- \* sur le flux: un flux faible favorise les réactions à grande section efficace.

Chacune de ces irradiations crée un certain nombre de R.I. qu'il faut distinguer par l'énergie des photons qu'ils produisent et par leur période.



• Détermination de l'énergie des photopics:

L'énergie des photopics permet la distinction la plus rapide. On peut comparer les spectres obtenus avec les spectres présents dans les catalogues. Cependant, ces catalogues donnent des spectres obtenus après irradiation d'éléments isolés ou bien même par comptage de R.I. isolés, alors que le spectre de l'échantillon à analyser risque d'être beaucoup plus complexe et il faut, ainsi, se méfier, en particulier, des pics « paire », « somme » et « de rétrodiffusion » qui pourraient être pris pour des pics photoélectriques.

L'énergie d'un pic se calcule d'après le numéro du canal où se trouve son sommet, compte tenu de l'étalonnage du sélecteur:

$$w_{\gamma} = w_1 + d (w_n - w_1) / n_{\text{tot}}$$

avec:

$n_{\text{tot}}$  = nbre de canaux employés de sélecteur,  
 $w_n$  = énergie correspondant au dernier canal,  
 $w_1$  = énergie correspondant au premier canal,  
 $d$  = numéro du canal central du pic,

Les principaux pics parasites donnés par des gamma d'énergie  $w_{\gamma}$  (en MeV) sont:

\* pics « de rétrodiffusion » :  $w_r = w_{\gamma} / (1 + (2 w_{\gamma} / 0,511))$

\* pics « paire » (si  $w_{\gamma} > 1,02$  MeV):  $w_p = w_{\gamma} - 1,02$  et  $w_p' = w_{\gamma} - 0,511$

\* pics « somme » ( $\gamma$  en cascade,  $\gamma$  + son rétrodiffusé, ...):

$$w_s = w_{\gamma 1} + w_{\gamma 2}$$

Lorsque le spectre n'est pas trop complexe, les listes donnant les énergies des gamma émis par les différents R.I. permettent de déduire le nom du R.I. de la connaissance de  $w_{\gamma}$ .

Détermination de la période des R.I.:

La connaissance de l'énergie seule ne suffit pas à déterminer un R.I. car les gamma émis par les R.I. sont très nombreux, surtout dans la zone de 0 à 1 MeV. C'est le cas en particulier:

- \* lorsque plusieurs photopics ont des énergies voisines de celle du photopic étudié.
- \* lorsqu'un autre photopic donne un pic voisin par somme, création de paires ou rétrodiffusion.
- \* lorsque le photopic est un pic d'annihilation à 0,511 MeV.

La présence, ou l'absence, de plusieurs photopics dus au même R.I. ou bien à plusieurs R.I. créés à partir du même élément, suffit souvent pour confirmer, ou infirmer,

l'existence dans l'échantillon de l'élément. Mais il est plus sûr de compléter l'analyse par la détermination des périodes des R.I. produits.

Pour cela, on délimite le photopic à étudier et on trace sa courbe de décroissance comme pour un dosage par décroissance. Lorsque la courbe, tracée sur papier semi-logarithmique, est décomposée en une série de droites, à partir de la période la plus longue, on obtient les périodes correspondantes en déterminant le temps nécessaire pour que les activités indiquées par les droites soient divisées par deux.

### 1.2.2. Principe de fonctionnement

**Principes de détection :** détection des rayonnements ; mesure de la radioactivité

La détection des rayonnements est fondée sur les phénomènes d'interaction avec la matière ; les détecteurs permettent de connaître la nature, le nombre, et l'énergie des particules émises par les sources radioactives.

On peut distinguer principalement deux groupes de détecteurs d'après leurs principes de fonctionnement : *ionisation de la matière* (compteur Geiger-Muller, semi-conducteurs) ; *excitation des orbitales électroniques* (détecteurs scintillants type NaI (TI)).

- **chambres d'ionisation :**

Elle est formée par deux électrodes placées dans une enceinte contenant un gaz (type gaz rare). Les particules alpha (ou bêta et gamma de haute énergie) provoquent l'ionisation qui est détectée par une variation de la différence de potentiel.

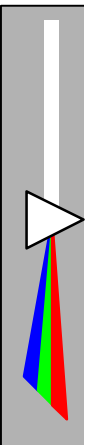
Avec des systèmes performants, on peut déceler individuellement chaque particule alpha. il est possible de tracer le spectre en énergie des particules.

- **compteurs Geiger-Muller :**

Ce sont des chambres d'ionisation permettant la détection des particules  $\beta$ , et dans certains cas les rayons  $\gamma$ . Le compteur est un cylindre rempli sous pression réduite d'un gaz rare mélangé à de l'alcool. Les électrons libérés par l'ionisation sont accélérés par le champ électrique au voisinage de l'anode, et ils provoquent de nouvelles ionisations en cascade.

- **compteurs à scintillation :**

Le rayonnement ionisant produit par excitation des atomes de la photocathode du photomultiplicateur (P.M.), l'émission de photons. L'intensité est proportionnelle à l'énergie cédée. il y a production par la photocathode d'électrons dont le flux est ensuite amplifié par des dynodes.



La variation du potentiel de cette photocathode permet de déterminer l'énergie perdue par le photon incident.

### 1.2.3. Description et mise en œuvre des détecteurs usuels

#### Les détecteurs semi-conducteurs

Un semi-conducteur est un matériau qui peut être soit isolant soit conducteur. On appelle détecteur semi-conducteur un détecteur composé d'un cristal unique qu'il soit élémentaire ou composé, ayant un Band Gap de l'ordre de 1 à 5 eV. Le groupe des Z4 dont font partie le silicium et le germanium sont de loin les semi-conducteurs purs les plus utilisés. Cependant, les recherches actuelles continuent dans le domaine des semi-conducteurs composés.

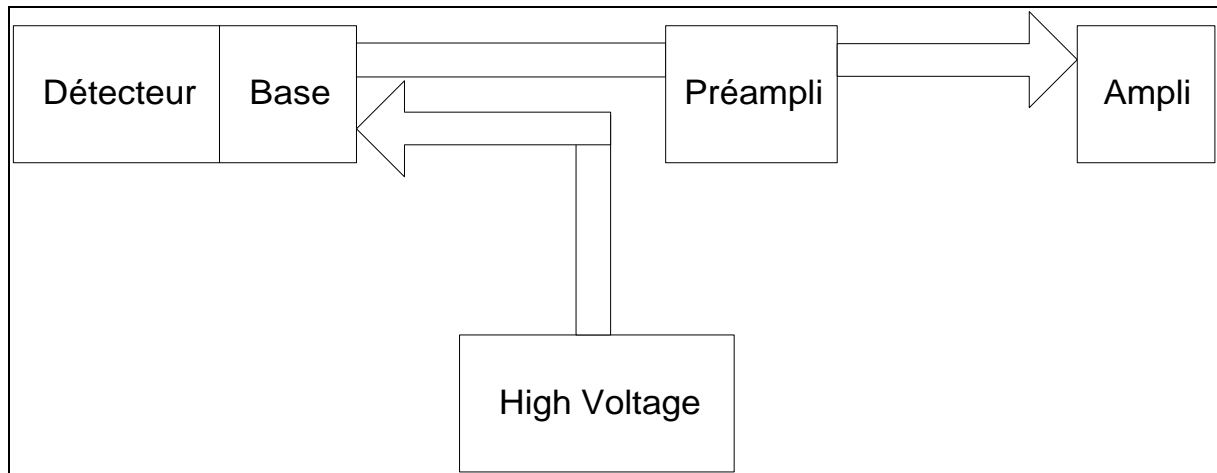


Figure 1 : détection à semi-conducteur

La charge électrique perçue est d'abord amplifiée par un préampli et convertie en pic de voltage avec une amplitude proportionnelle à l'énergie du photon énergétique incident. Cependant, l'importance de la diminution d'amplitude est inversement proportionnelle à la concentration en impuretés dans le matériau. C'est pourquoi, de gros volumes de matériau semi-conducteur très purs sont indispensables à la détection de photons de haute énergie. Au début, durant les années 70, l'indice de pureté suffisant n'était acquis que par introduction de cristaux de type n (le lithium en particulier) dans le Silicium et dans le Germanium qui sont de type p. Cependant, si de tels mélanges sont encore utilisés pour des détecteurs de rayons X, ils ne sont plus utilisés pour des détecteurs de type germanium depuis 1976, date à laquelle le semi-conducteur germanium a pu être fabriqué en pureté suffisante.

Il faut noter que les détecteurs Germanium ont des températures d'utilisation inférieures à celles des détecteurs de type Silicium. Il faut cependant les refroidir tous les deux pour réduire le déplacement des charges à un niveau acceptable. Le moyen le plus couramment utilisé pour rafraîchir le composé semi-conducteur est l'azote liquide. On place donc le système cristal de germanium-préampli dans une chambre à vide au sommet d'un

cryostat rempli d'azote liquide et on introduit un contact thermique entre les deux. L'azote liquide à la température de  $-200^{\circ}\text{C}$  refroidit le germanium en cours d'utilisation. Cependant, notons que des cryostats réfrigérés électriquement sont actuellement à l'étude.

L'intérêt de ces nouveaux types de cryostats est bien sûr d'être utilisables dans des lieux où on ne trouve pas facilement d'azote liquide. Mais surtout, ces appareils peuvent donc être utilisés pour de plus longs temps de traitement ou encore pour des opérations sous marines ou spatiales par exemple où il est plus compliqué de s'approvisionner en azote liquide qu'en énergie électrique.

#### Structure du détecteur:

Les premiers détecteurs de photons semi-conducteurs étaient simplement plans. Pour réduire les pertes, on a d'abord mis au point un détecteur incurvé, puis le détecteur Germanium de type « coaxial » fut mis au point. pour augmenter le volume de détection. Les détecteurs de type « puits » de la même manière en mettant la source au coeur même du détecteur.

#### Performance:

##### Résolution:

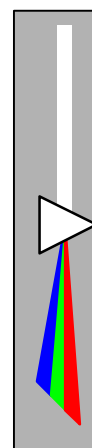
Les détecteurs semi-conducteurs ont une grande résolution par rapport aux autres types de détecteurs. Fondamentalement, cet avantage en résolution peut être attribué à la faible quantité d'énergie nécessaire au déplacement des charges. On obtient donc un large signal de sortie pour un même photon incident. On obtient les performances suivantes:

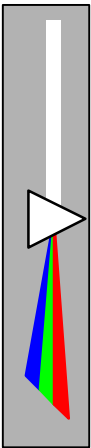
Résolution énergétique en fonction du type de détecteur:

Energie (KeV)	5.9	1.22	1.332
Compteur proportionnel	1.2	—	—
Rayons X NaI	3.0	12.0	—
3 X 3 NaI	—	12.0	60
Si (Li)	0.16	—	—
Germanium plan	0.18	0.5	—
Germanium coaxial	—	0.8	1.8

##### Efficacité:

L'efficacité est proportionnelle au numéro atomique. On a 14 pour le Silicium, 32 pour le Germanium, 48-52 pour CdTe, 80-53 pour  $\text{HgI}_2$ , 31-33 pour GaAs. Ceci explique pourquoi le Silicone est relégué essentiellement au domaine des faibles énergies (rayons X). De plus, si les semi-conducteurs ont de très importants numéros atomiques, des déplacements de charges et d'autres considérations font qu'il est difficile d'en obtenir dans de gros volumes. Or notre domaine de 20KeV à 2MeV nécessite de gros volumes de détecteurs. Les détecteurs de type Germanium coaxiaux sont spécifiques en terme d'efficacité pour les pics d'énergie totale par rapport au détecteur de Scintillation NaI de 3 inches par 3 inches. Des détecteurs de plus de 100% d'efficacité ont été obtenus pour des





cristaux de Germanium de 75 mm. de diamètre. Cela représente à peu près 2Kg de Germanium pur.

### Les détecteurs au Germanium

Il existe aujourd'hui de nombreux types de générateurs au Germanium. Chacun répond à une ou plusieurs exigences de l'utilisateur. Ainsi, certains offriront une efficacité ou une résolution optimale, d'autres ne seront véritablement efficaces que dans un intervalle d'énergie bien précis, etc. Cependant, on peut classer ces différents types de détecteurs selon trois grandes catégories:

- les détecteurs **plans**,
- les détecteurs **coaxiaux**,
- les détecteurs **puits**.

Ces trois détecteurs se différencient avant tout par leur géométrie qui leur fait acquérir des caractéristiques différentes.

- Les détecteurs **plans**

Les détecteurs plans se présentent comme des parallélépipèdes rectangles de Germanium, plus ou moins gros, mais qui n'excède en général jamais une épaisseur de 10 mm pour un volume de 100 mm<sup>2</sup>. Ces détecteurs sont utilisés pour des énergies comprises entre 1 keV et 1000 keV. Ces types de générateurs restent donc adaptés aux faibles et moyennes énergies. Au-delà de 1000 keV, il faudra utiliser des détecteurs types coaxiaux ou puits.

Le Germanium étant un corps lourd (son numéro atomique Z vaut 32), les détecteurs au Germanium possèdent une bonne efficacité pour les moyennes et hautes énergies. Par contre, en-dessous de 3 keV, l'efficacité et la forme des pics est nettement moins bonne. On peut cependant arriver à obtenir de bons résultats, même à de telles énergies, en modifiant légèrement la géométrie du détecteur (en particulier en disposant de manière adéquate les contacts N<sup>+</sup> et P<sup>+</sup>, ou en rajoutant des fenêtres au-dessus du détecteur dans une matière appropriée. On peut ainsi rajouter des fenêtres en polymère, en Béryllium ou en Aluminium pour les applications concernant des énergies supérieures à 30 keV. On peut aussi essayer de diminuer la capacité du détecteur pour éviter au maximum le phénomène de bruit et pour avoir ainsi une meilleure résolution.

Ci-dessous est représenté figure 2 un détecteur plan auquel on a ajouté une mince fenêtre en Béryllium (épaisseur de l'ordre de la dizaine de microns) et un tableau correspondant aux différents niveaux de résolution selon l'épaisseur du morceau de Germanium, son volume et l'épaisseur de la fenêtre de Béryllium.

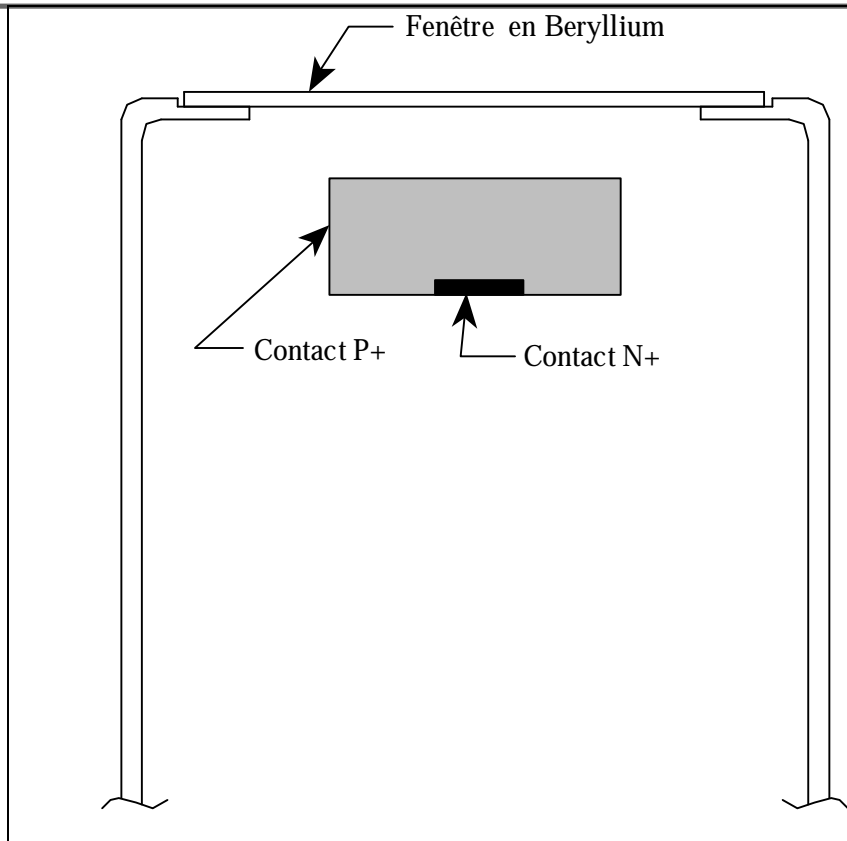


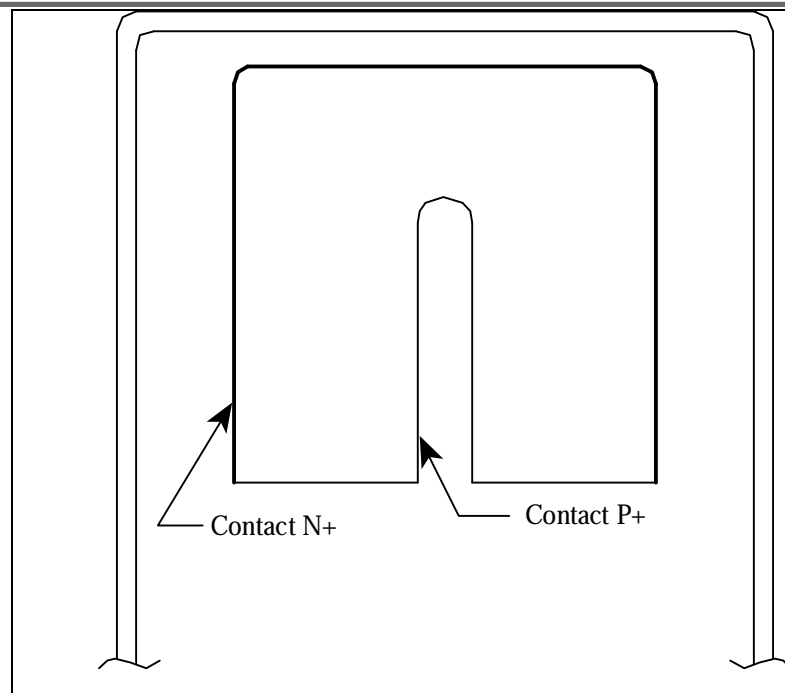
Figure 2 : détecteur plan au germanium

Volume (mm <sup>2</sup> )	Epaisseur (mm)	Epaisseur de la fenêtre en Be (mm)	Résolution FWHM 5.9 keV	Résolution FWHM 122 keV
50	5	0.05	160	500
100	10	0.075	180	500
200	13	0.15	195	510
500	15	0.15	250	550
1000	15	0.5	300	650
2000	20	0.5	400	700

- Les détecteurs **coaxiaux**

Comme l'indique le schéma présenté figure 3, un détecteur au Germanium coaxial est un cylindre de Germanium, avec sur sa surface externe un contact de type p, et un contact de type n sur la surface d'un puits axial intérieur. Ces deux surfaces jouent évidemment le rôle d'électrodes et le courant créé est proportionnel à l'énergie incidente du photon gamma.





**Figure 3 : détecteur coaxial au germanium**

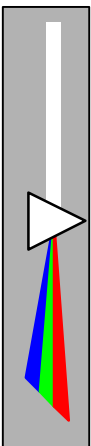
Comme tout détecteur au Germanium, les détecteurs coaxiaux doivent, lors de leur utilisation, être refroidis avec de l'azote liquide afin d'éviter les courants électriques dont la cause serait due à une simple agitation thermique. Un tel détecteur peut cependant être transporté et stocké sans besoin de refroidissement.

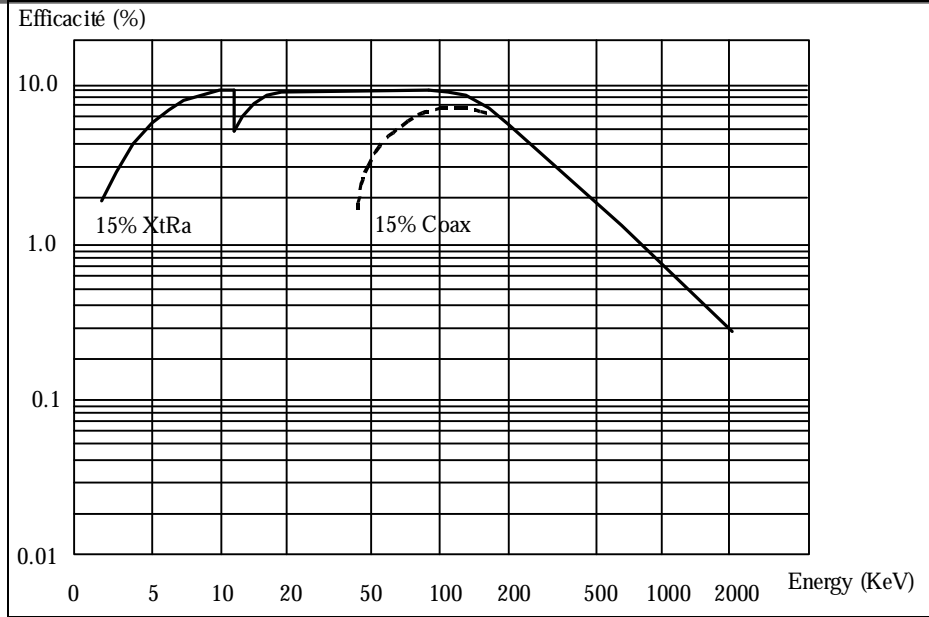
La bande d'énergie utilisable avec un tel générateur va de 50 keV à plus de 10 MeV. Les principales qualités d'un tel détecteur sont sa large bande d'énergie, sa remarquable résolution et la qualité de la forme des pics.

On peut, comme pour les générateurs plans, rajouter une mince fenêtre de Béryllium. Ceci a pour effet d'élargir la bande d'énergies utilisables à des énergies en-deçà de 3 keV. On peut aussi remplacer la fenêtre de Béryllium par une fenêtre en Aluminium.

On peut aussi intervertir les surfaces de contact type p et n. Les caractéristiques restent néanmoins les mêmes que pour le premier générateur coaxial.

Ci-dessous est représentée figure 4 l'efficacité de deux détecteurs coaxiaux provenant du constructeur Canberra. Le *Coax* correspond au générateur coaxial simple, tandis que le *XtRa* est un générateur auquel on a ajouté la fine fenêtre de Béryllium.

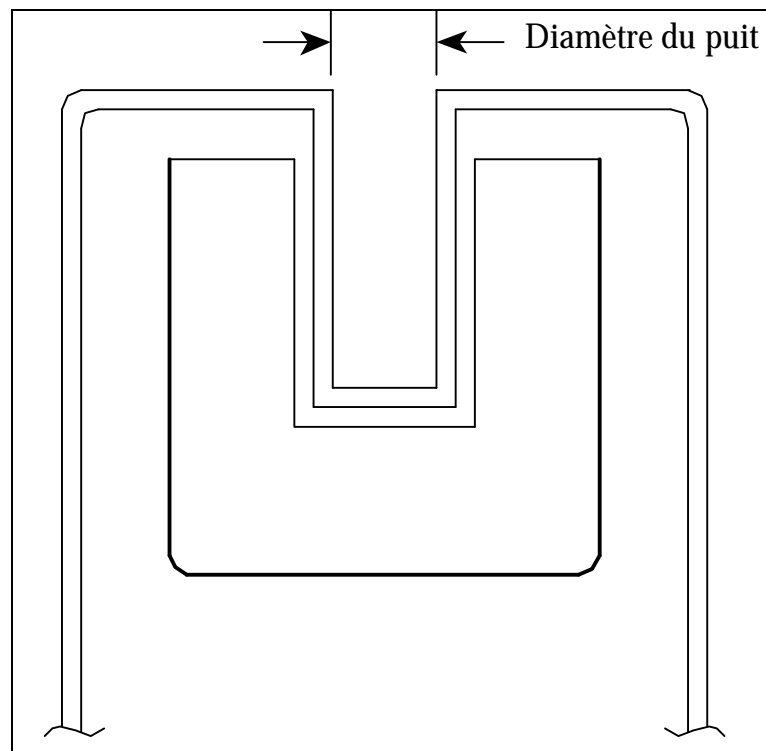




**Figure 4 : efficacité des détecteurs coaxiaux**

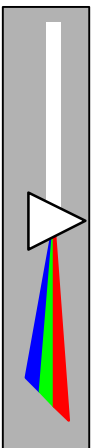
- Les détecteurs puits

Le détecteur puits se présente comme un cylindre en Germanium où est creusé en son centre un puits d'une profondeur standard de 40 millimètres (cf figure 5).



**Figure 5 : détecteur puits au germanium**





Les détecteurs puits offrent une efficacité maximale pour les petits échantillons car l'échantillon est pratiquement entouré de Germanium. L'angle solide correspondant aux photons émis et réellement détectés par le métal est donc proche de  $4\pi$ .

Pour de tels détecteurs, le Germanium doit être très pur et peut donc être transporté ou stocké à température ambiante. Un changement répétitif de température n'altère pas ses performances. Le diamètre du puits peut varier selon les modèles. Il est cependant souvent proche de 10mm et n'excède pas 20mm.

#### 1.2.4. Offre commerciale

Tableau des appareils présents sur le marché avec caractéristiques principales. Faire des graphes de performances quand c'est possible. Elaborer un questionnaire donnant les caractéristiques et spécifications permettant à l'utilisateur de rédiger un cahier des charges ou questionnaire destiné au constructeur avant achat

#### 1.2.5. Critères de choix

Système expert qui permet de rechercher les appareils qui répondent à un certain nombre de caractéristiques choisies par l'utilisateur. Voir Philippe Beaune à SIMADE.

#### 1.2.6. Bibliographie

Liste des livres importants et des articles de fond publiés par les revues. Penser à Analytical Chemistry qui publie une bibliographie annuelle avec toutes les références connues.

### 1.3. Effets biologiques des radiations sur l'environnement et l'être humain

#### 1.3.1. Influence sur l'environnement

La **radioécologie** est l'étude du cheminement et du devenir des radioéléments libérés dans l'environnement. Elle a pour but de déterminer depuis les sources d'émission, les voies : air, eau, sol, chaînes alimentaires et les modalités d'atteinte de l'homme.

Après avoir présenté les différentes sources de rayonnement, nous allons nous intéresser aux principes généraux de la radioécologie puis nous expliciterons les transferts des radionucléides dans l'environnement.

#### 1.3.1.1. Les différentes sources de rayonnement émises dans l'environnement

- Radioactivité naturelle :  ${}^7\text{Be}$ ,  ${}^{14}\text{C}$ ,  ${}^{40}\text{K}$ ,  ${}^{235}\text{U}$ ,  ${}^{238}\text{U}$ ,  ${}^{232}\text{Th}$
- Retombées des essais nucléaires militaires dans l'atmosphère :  ${}^{137}\text{Cs}$ ,  ${}^{65}\text{Zn}$ ,  ${}^{144}\text{Ce}$ ,  ${}^{239}\text{Pu}$ ...

- Mines d'uranium :  $^{226}\text{Ra}$
- Centrales électronucléaires :  $^{54}\text{Mn}$ ,  $^{58}\text{Co}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{110\text{m}}\text{Ag}$ ,  $^{124}\text{Sb}$ ,  $^{131}\text{I}$ ,  $^{134}\text{CS}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ...
- Usines de retraitement du combustibles :  $^{106}\text{Ru}$ ,  $^{106}\text{Rh}$ ,  $^{103}\text{Ru}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Sb}$ ...
- Retombées d'accidents :  $^{106}\text{Rh}$ ,  $^{103}\text{Ru}$ ,  $^{110\text{m}}\text{Ag}$ ,  $^{124}\text{Sb}$ ,  $^{131}\text{I}$ ,  $^{134}\text{CS}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ...

### 1.3.1.2. Principes généraux de la radioécologie

Les radionucléides sont de remarquables *traceurs* dont on peut suivre le devenir sur la planète dans les milieux atmosphériques, aquatiques et terrestres. Ainsi ils peuvent être détectés très aisément et à des concentrations de plusieurs ordres de grandeurs inférieures à celles susceptibles d'avoir un impact sur les êtres vivants, ce qui présente un intérêt exceptionnel dans le domaine sanitaire.

Pour envisager le devenir des radionucléides depuis leur point de rejet jusqu'à l'homme, on décompose les écosystèmes en une série de *compartiments radioécologiques*. A chaque instant on peut relier la concentration du radionucléide dans un compartiment à celle de ce même radionucléide dans un autre compartiment par une fonction appelée *fonction de transfert*.

A l'échelle d'une zone géographique (vallée, fleuve, océan), on mesure simplement les facteurs de concentration  $F_c$  : pour les transfert en milieu aquatique,  $F_c$  est le rapport entre la radioactivité de 1 kg d'un organisme aquatique et 1 kg d'eau douce ou salée.

En outre certaines espèces fixent sélectivement certains radionucléides présents dans l'écosystème avec un facteur de concentration élevé. On dit qu'il s'agit d'*indicateurs radiologiques* qui jouent le rôle de balise biologique au sein de l'environnement. Ils sont utilisé comme tels pour suivre le cheminement des radionucléides et mettre en évidence les faibles variations qui, sans eux, ne pourraient être détectées.

Il s'agit soit d'espèces les moins évoluées (zooplanctons, mousses, lichens...), soit d'espèces parasites (champignons) soit de végétaux à grand pouvoir d'occupation des sols (thym), ou d'organisme qui filtrent de grands volumes d'eau (mollusques).

### 1.3.1.3. Transfert des radionucléides dans l'environnement

Le transfert des radionucléides dans l'environnement s'opère de différentes façons : on peut citer comme principaux types de transfert :

- captation par les végétaux, avec en particulier les rapports fruits-feuilles et racines-fruits



- dépôt et rétention par le sol
- dépôt sur l'eau avec mise en solution et en suspension
- remise en suspension des particules solides (poussières) ou liquides (embruns)
- transfert aux produits d'origine animale
- transferts à l'homme (par la voie de la chaîne alimentaire)

Que deviennent des radionucléides dans le milieu ?

Les rejets gazeux ont tendance à se diluer dans l'atmosphère par diffusion ou brassage de façon variable en fonction de différents facteurs (hauteur du point des émissions, nature des radioéléments...) et notamment des conditions météorologiques (courants, vents, température, pluviosité).

Les rejets liquides se diluent dans l'eau de façon variable en fonction de différents facteurs (distance au point de rejet, nature des radioéléments, temps écoulé, courant, température...). Les radionucléides peuvent se fixer sur les sédiments ou sur les matières en suspension par adsorption ou échanges d'ions ou encore dans les organismes aquatiques.

Les radionucléides sous forme liquide, solide, ou provenant des retombées atmosphériques peuvent pénétrer dans le sol directement ou indirectement par solubilisation puis migrer. Les caractéristiques géologiques du milieu sous-jacent perméable, ou non, ont une grande importance ainsi que les conditions météorologiques.

#### ***1.3.1.4. Transferts des radionucléides dans les chaînes alimentaires terrestres***

Ces transferts sont très complexes. Les trois grandes étapes sont : la migration dans le sol, les transferts sol-plantes, les transferts plante-animal.

La migration dans le sol et la décroissance radioactive sont les principaux mécanismes qui déterminent l'absorption des radionucléides par les produits végétaux et animaux. Elle n'a été étudié que pour un nombre limité d'éléments à vie longue que l'on trouve dans les retombées des essais nucléaires, c'est-à-dire le césium, le strontium et le plutonium.

Le transfert aux plantes se fait :

- par interception et rétention du dépôt, direct ou provenant du sol par remise en suspension;
- par translocation foliaire

- par absorption racinaire

En ce qui concerne le transfert à l'homme dans le cas de légumes-feuilles (poireaux, salades), on estime que 90 % du dépôt externe est éliminé durant la préparation de l'aliment.

Pour un même sol, les végétaux peuvent concentrer un élément plus ou moins énergétiquement. Ainsi l'avocat concentre le césium plusieurs centaines de fois de plus que les autres fruits poussant sur le même sol.

On constate que sur le plan de l'alimentation humaine d'origine animale, les radionucléides les plus significatifs sont l'iode 131 (période 8 jours), le césium 134 (2,2 ans) et 137 (30 ans) et à un moindre degré les strontium 89 (50,7 jours) et 90 (28,5 ans).

#### ***1.3.1.5. Transfert des radionucléides dans les chaînes aquatiques***

Pour faire cette étude, il faut distinguer les données relatives au milieu des eaux douces et au milieu marin.

##### **1.3.1.5.1. Radioécologie des eaux douces**

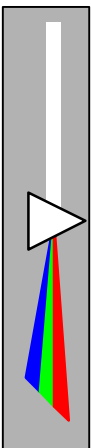
En premier lieu une étude de terrain a pour but de récolter des échantillons d'eau, de sédiments, de végétaux et animaux aquatiques (mousses) constituant des bio-indicateurs. Ce sont ensuite des études en laboratoire (explication et évaluation des processus de transfert) qui conduiront à la conception de modèles expérimentaux.

Prenons comme exemple un écosystème constitué de cinq compartiments : eau, sédiments, larve de chironome (insecte), daphnie (petit crustacé), carpe. Une étude a permis de mettre en évidence, chez un poisson l'additivité des voies d'accumulation du  $^{137}\text{Cs}$  et d'évaluer l'importance relative des différents vecteurs possibles : eau (1%), sédiment (10 à 40 %), nourriture (50 à 90 %). Le facteur de concentration du  $^{137}\text{Cs}$  pour la carpe varie de 200 à 1000 selon les facteurs biotiques et abiotiques pris en compte.

##### **1.3.1.5.2. Radioécologie en milieu marin**

C'est l'étude des interactions entre les radionucléides naturels ou artificiels et les constituants du milieu marin. Elle présente un intérêt tout spécial sur le plan de la protection sanitaire dans le cas de rejets d'effluents faiblement radioactifs en mer effectué par les centrales nucléaires. Ces rejets ne doivent pas constituer une entrave à l'utilisation par l'homme du milieu marin (pêche...). En France des laboratoires de radioécologie marine de la Hague et de Toulon de l'Institut de protection de l'environnement et des installations travaillent avec d'autres organismes français (CNRS, IFREMER, Universités, ministère de l'Environnement) ou étrangers et consacrent leurs activités à la surveillance de l'environnement et à la recherche.





Pour interpréter l'évolution de la radioactivité des espèces il faut appréhender l'influence de leur cycle biologique et les cinétiques de fixation et de perte des radioéléments. Ceci ne peut être observable que dans des secteurs éloignés du point de rejet et qui constituent des zones témoins. Pour ce faire on utilise des espèces biologiques indicatrices animale et végétale.

L'espèce végétale la plus intéressante est l'algue brune *Fucus serratus*, c'est un excellent bio-indicateur de la distribution de la radioactivité artificielle. Elle est commune sur toute la frange littorale des mers du nord-est de l'Europe et présente des capacité de fixation importante pour un maximum de radionucléides.

En ce qui concerne les espèces animales, nous nous intéressons plus particulièrement aux espèces marines de consommation courante : poissons, coquillages, crustacés. Les différents radionucléides ne sont pas bioaccumulés de façon identique par les différentes espèces et de plus, pour une espèce donnée, les radioéléments se fixent de façon plus sélective dans certains de leurs organes ou tissus. Les radionucléides qui sont libérés dans le milieu pénètrent dans l'animal par trois voies : branchiale, digestive ou tégumentaire. Ils vont ensuite être concentrés dans des organes ou tissus cibles ( muscle, glande digestive, exosquelette) variable selon les espèces et la forme physico-chimique du radionucléide. Enfin ils pourront être éliminés essentiellement par les organes excréteurs et par le tractus digestif.

La conclusion des études qui ont été réalisées aussi bien dans les milieux aquatiques que terrestre est que les niveaux de radioactivité artificielle sont extrêmement faibles comparés aux niveau de la radioactivité naturelle.

### 1.3.2. Effets biologiques de la radioactivité sur le corps humain

Dresser un catalogue des effets de la radioactivité sur l'homme est loin d'être simple. Tout est fonction de la dose reçue, du temps de l'irradiation, de l'organe touché.

En réalité aucun être humain ne peut échapper au bain de radioactivité dans lequel le monde est plongé. En effet la radioactivité est partout. Les roches, l'eau, les maisons, le ciel en émettent. Ainsi l'homme est irradié de deux manières : externe et interne. A l'intérieur et à l'extérieur de l'organisme. Mais certains individus reçoivent plus de rayonnement que d'autres selon leur lieu de résidence et leur mode de vie.

Il faut noter que les différentes formes de rayonnement ont des énergies et des pouvoirs de pénétration très divers et de ce fait ont des effets très différents.

Le rayonnement alpha est arrêté par une feuille de papier et peut à peine traverser les couches supérieures de la peau. Il est donc dangereux que si les substances émettrices sont à l'intérieur de l'organisme. Le rayonnement bêta est plus pénétrant mais moins nocif en cas d'irradiation interne que le rayonnement alpha. Le rayonnement gamma est particulièrement pénétrant et arrêté que par une épaisse plaque de plomb ou de béton.

C'est l'énergie du rayonnement qui cause les dommages, la quantité d'énergie déposée dans le tissu vivant est appelée dose. Celle-ci peut être due à un ou plusieurs radionucléides, qu'ils se trouvent à l'extérieur du corps ou qu'ils irradient de l'intérieur après avoir été inhalés avec l'air ou ingérés via aliments ou eau de boisson. Il faut cependant pondérer la dose par le pouvoir qu'elle possède de causer des dommages puisque comme nous l'avons vu les rayonnements ne sont pas équivalents. La dose ainsi pondérée est appelée équivalent de dose dont l'unité de mesure est le sievert (l'unité de mesure d'une dose absorbée étant le gray).

### *1.3.2.1.L'action des rayons*

En observant les lésions ou symptômes des personnes en contact avec des substances radioactives, les principaux effets nocifs des radiations furent mises en évidence comme par exemple la mort cellulaire ou la cancérisation ou même les mutations (modification brutale et irréversible des caractéristiques héréditaires). Peu à peu le développement des connaissances scientifiques a permis de passer de l'observation à la compréhension de ces phénomènes.

La gravité des dégâts causés par l'irradiation sur les tissus dépend de l'intensité du rayonnement mais aussi de la nature du rayonnement, c'est pour cela qu'on parle de l'effet biologique relatif que l'on exprime par un facteur de qualité.

L'effet de l'irradiation sur la matière est d'arracher des électrons et donc de produire des ions. Il y a donc ici choc énergétique et si la force de l'irradiation n'est pas suffisante pour arracher des électrons elle peut du moins exciter les atomes et les molécules.

Dans la matière vivante le choc des particules contre les atomes constituant les tissus exerce un puissant effet déstabilisateur et destructeur par la violence même du choc. A cela s'ajoute l'émission de chaleur et l'enclenchement de réactions en chaîne de très grande vitesse. Un facteur clé est l'action de la radiation sur les molécules d'eau, constituant principal de la matière organique (70-80%). La formation de radicaux libres (protons H<sup>+</sup>) de très haute réactivité chimique et d'eau oxygénée dans les tissus crée de multiples perturbations en particulier dans les fonctions du métabolisme. Ces radicaux formes par radiolyse peuvent aussi agir sur les constituants des cellules, sur les précurseurs des protéines, les gènes; ils peuvent désorganiser des chaînes complexes, altérer des enzymes... Et un changement minime dans la composition d'une protéine peut suffire pour produire de graves perturbations de fonctionnement.

### *1.3.2.2.Effets médicaux*

#### 1.3.2.2.1.Effets précoces

- Irradiation générale à forte dose

Le tissu le plus sensible est la moelle osseuse (qui produit les cellules sanguines), puis les muqueuses digestives. Les manifestations pathologiques sont en premier lieu des modifications de la formule sanguine, puis des troubles digestifs.



- Irradiation partielle à forte dose

Les manifestations sont variables en fonction des organes irradiés. Les plus sensibles sont les glandes génitales (stérilité transitoire ou définitive et arrêt de la production hormonale dans les ovaires ou les testicules), la peau, l'oeil (cataracte), la thyroïde, les poumons, les muqueuses digestives.

Plusieurs facteurs influent sur la nocivité de la contamination interne.

\* la voie d'absorption, le plutonium par exemple est plus dangereux quand il est inhalé que quand il est ingéré.

\* la nature du rayonnement, la période du radioélément et l'organe ou le tissu où il se fixe. En effet il existe des organes ou tissus cibles qui fixent préférentiellement un radionucléide donné : l'iode par exemple se fixe dans la thyroïde et le césium dans le muscle.

#### 1.3.2.2.Effets tardifs

Il se peut qu'ils apparaissent que plusieurs décades après l'irradiation.

### 1.4. La radioprotection

Comme nous l'avons compris à travers la partie précédente, l'utilisation des rayonnements ionisants présente des risques : elle implique donc des précautions de sécurité destinées à réduire au plus bas niveau possible, compte tenu des facteurs socio-économiques, l'exposition tant individuelle que collective et faire que cette exposition reste toujours inférieure aux limites admissibles.

La prévention des risques de la mise en oeuvre de sources de rayonnements ionisants s'appelle la **radioprotection**.

De nombreux organismes officiels sont impliqués dans le problème de la radioprotection. Ci après sont présentés les principaux d'entres eux

<b>MINISTERE DU TRAVAIL</b>	: direction des relations du travail
<b>SCPRI</b>	: service central de protection contre les rayonnements ionisants
<b>CIREA</b>	: commission interministérielle des radioéléments ionisants
<b>AFNOR</b>	: association française de normalisation
<b>UTE</b>	: union technique de l'électricité
<b>DRTE</b>	: direction régionale du travail et de l'emploi
<b>DDTE</b>	: direction départementale du travail et de l'emploi
<b>CRAM</b>	: caisse régionale d'assurance maladie
<b>DRIR</b>	: direction régionale de l'industrie et de la recherche (inspection des installations classées)

Leur action s'appuie sur un certain nombre de textes réglementaires dont en voici une liste non exhaustive.

- Décret n° 86-1103 du 2 octobre 1986 relatif à la protection des travailleurs contre les dangers des rayonnements ionisants.
- Arrêté du 1<sup>er</sup> juin 1990 approuvant les méthodes de contrôle élaborées par le SCPRI.
- Arrêté du 19 Avril 1968 précisant les conditions d'utilisation des dosimètres individuels, destinés au contrôle des équivalents de dose reçues par les travailleurs directement affectés à des travaux et exposés au risque d'exposition externe. (confirmé par l'arrêté du 30 septembre 1987)
- Arrêté du 28 août 1991 approuvant les termes des recommandations aux médecins exerçant la surveillance médicale des travailleurs soumis aux dangers des rayonnements ionisants.
- Arrêté du 25 juin 1987 relatif au certificat d'aptitude à manipuler les appareils de radioscopie industrielle et de radiographie industrielle.
- Arrêté du 25 novembre 1987 relatif à la formation de la personne compétente à la radioprotection.

Le but de ces textes réglementaires est de définir les limites admissibles d'exposition et d'imposer des règles de sécurité minimales à respecter non seulement en ce qui concerne la protection des travailleurs exposés aux risques mais aussi le respect de l'environnement.

#### *1.4.1. Protection de l'environnement*

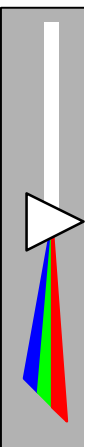
##### *1.4.1.1. Maîtrise et des conditions de détention et d'utilisation des matériels et installations.*

La protection de l'environnement passe par une conformité des installations à certaines normes. Le contrôle de ces installations s'organise autour de 3 points:

##### 1.4.1.1.1. Déclarations de détention et d'utilisation

Les déclarations suivantes sont applicables à toutes les installations et appareils émettant des rayons ionisants.

- déclaration à l'inspecteur du travail
- copie de cette déclaration au service de prévention de l'organisme de sécurité sociale compétent.



#### 1.4.1.1.2. Autorisation de détention CIREA

Pour ce qui concerne les installations destinées à l'utilisation de radioéléments artificiels (sources radioactives scellées ou non scellées), une *autorisation de détenir et d'utiliser* des substances radioactives est donnée par la commission interministérielle des radioéléments artificiels (CIREA).

La notification d'autorisation est délivrée après examen des compétences des personnels responsables et des conditions d'utilisation.

La notification fixe les activités maximales autorisées dans des locaux donnés et est renouvelable avec une périodicité qui dépend du type d'application.

Les installations dans lesquelles sont détenues ou utilisées des substances naturelles ou artificielles peuvent être classées en fonction des radioéléments et des activités détenues:

- non classées
- soumises à déclaration préalable
- soumises à autorisation préalable

#### 1.4.1.1.3. Construction des équipements et appareils

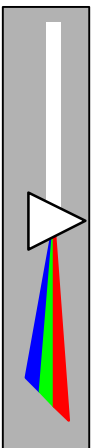
Les appareils de radiographie gamma doivent satisfaire aux règles applicables aux machines et appareils dangereux mentionnées au *code du travail*.

Des normes françaises homologuées diffusées par l'AFNOR et l'UTE définissent les règles de construction et sont applicables pour tout marché public, lorsqu'elles sont rendues obligatoires par un texte législatif et chaque fois que le cahier des charges y fait référence.

#### ***1.4.1.2. Le contrôle des rejets radioactifs***

Les industries, et notamment les centrales nucléaires, sont parfois amenés à effectuer des rejets radioactifs dans la nature. Les dangers sont très importants.

Il convient donc de contrôler très étroitement ce processus de rejet, et c'est dans ce domaine que la radioprotection entre en jeu.



#### 1.4.1.2.1. Les normes de base EURATOM

En application du traité Euratom, le conseil des communautés européennes fixe des normes de base relatives à la protection sanitaire de la population contre les dangers résultants des radiations ionisantes. Ces normes sont établies sur la base des recommandations d'une commission scientifique internationale indépendante des gouvernements (CIPR commission internationale de protection radiologique). Elles engagent les états membres qui doivent établir une réglementation qui leur soit conforme.

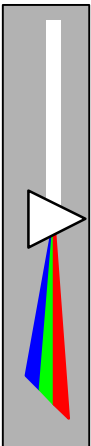
L'article 38 du traité confie à la communauté des pouvoirs d'injonction pour assurer le respect de ces normes. L'article 37 prévoit la communication des projets de rejets à la communauté qui émet un avis après la consultation d'un groupe d'experts.

#### 1.4.1.2.2. La réglementation française

Le respect de ces normes est assuré en France par les décrets du 6 novembre 1974 pour les effluents gazeux et du 31 décembre 1974 pour les effluents liquides, complétés par une série d'arrêtés du 10 août 1976. Les rejets par les centrales d'effluents radioactifs liquides ou gazeux sont soumis à des autorisations spécifiques qui doivent être délivrées avant les premiers essais du réacteur, au terme de procédures voisines instruites par le Service Central de Sûreté des Installations Nucléaires (SCSIN), le Service Central de Protection contre les Rayonnements Ionisants (SCPRI), qui dépend du ministère de la santé, étant consulté pour avis. Ces procédures prévoient:

- **une étude préliminaire**, déposée au plus tard avec la demande d'autorisation de création et soumise à l'avis du SCPRI.
- **une prise en considération** de cette étude qui équivaut à l'autorisation de déposer une demande.
- **une demande**, déposée au plus tard un an avant les premiers rejets, accompagnée d'une étude définitive et d'une étude d'impact présentant une analyse de l'état initial du site et de son environnement, décrivant les effets des rejets sur l'environnement, indiquant les mesures envisagées pour en supprimer ou réduire les conséquences et expliquant les raisons qui ont conduit à en retenir les modalités. Cette étude définitive est soumise à un nouvel avis du SCPRI.
- **une enquête publique** dont les modalités diffèrent suivant qu'il s'agisse d'effluents liquides ou gazeux.
- **une conférence administrative** locale qui réunit généralement outre la direction départementale des affaires sanitaires et sociales (DDASS) la délégation nationale de l'industrie et de la recherche (DRIR), la direction départementale de l'agriculture et de la forêt (DDAF) et la direction départementale de l'équipement (DDE).





- Au terme de la procédure, l'autorisation est accordée par arrêté conjoint des ministres de la santé, de l'environnement, de l'électricité, et en cas de rejet liquide en eau de mer, du ministre chargé des transports. Cet arrêté fixe les limites et les modalités d'exécution et de contrôle des rejets autorisés, le contrôle étant effectué par les agents du SCPRI.

#### 1.4.2. La radioprotection des personnes.

##### 1.4.2.1. Répartition des individus d'une population du point de vue du risque d'exposition

Les limites d'exposition ont été définies compte tenu d'une classification par groupes d'individus et par types d'individus.

###### 1.4.2.1.1. groupes d'individus

Les groupes d'individus sont répartis comme suit:

- les personnes du *public* considérées individuellement et qui vivent au voisinage d'établissements détenant des sources de rayonnement ionisants.
- Les travailleurs d'un établissement détenant des sources de rayonnement ionisants comprenant:
  - \* Les personnes non professionnellement exposées, assimilables au groupe personnes du public
  - \* Les personnes professionnellement exposées au cours de leur travail qui se divisent en
    - Travailleurs de catégorie B ou travailleurs non affectés à des travaux sous rayonnement (NDATR): personnes qui, travaillant habituellement en zone surveillée, peuvent occasionnellement pénétrer en zone contrôlée
    - Travailleurs de catégorie A ou travailleurs directement affectés aux travaux sous rayonnement (DATR): personnes qui exercent de façon habituelle leur activité professionnelle en zone contrôlée.

###### 1.4.2.1.2. Types d'individu

Cette classification concerne le personnel professionnellement exposé. On distingue :

- Les individus *adultes* hommes et femmes âgés de plus de 18 ans.
- Les *apprentis*. Les apprentis âgés de 16 à 18 ans qui se destinent à une profession dans l'exercice de laquelle ils seront exposés aux rayonnements ionisants, ne peuvent l'être que pour les besoins de leur formation. Aucune autre personne de moins de 18 ans ne peut être classée parmi les personnes exposées aux rayonnements ionisants pour raison professionnelle.

- Le personnel féminin subdivisé en:
  - \* femmes en état de procréer.
  - \* femmes non en état de procréer.
  - \* femmes enceintes dont la grossesse est déclarée.
  - \* femmes qui allaitent.

#### *1.4.2.2.Limites d'exposition professionnelles*

Sur la base des résultats des recherches expérimentales et des études épidémiologiques, des règlements et recommandations ont été édictés concernant les niveaux autorisés d'exposition aux polluants physiques et chimiques. Les rayons ionisants n'échappent pas à ces règles. L'unité relatives aux expositions aux rayons ionisants est le **millisievert** (1 Sievert=100 Rem).

Le tableau ci-après donne un aperçu des maximales autorisées pour des adultes exposés professionnellement aux radiations ionisantes ainsi que les doses admises pour la population en général. Pour cette dernière on a recommandé, durant de nombreuses années, que la dose génétiquement significative reçue ne dépasse pas 50 mGy jusqu'à 30 ans, c'est-à-dire 1.70 mGy par ans jusqu'à 30 ans, ceci en se basant sur le fait que la majorité des gens ont leurs enfants avant cet âge. A l'heure actuelle, cependant, compte tenu du fait que les effets génétiques sont de type stochastique, on demande que les niveaux d'exposition soient maintenus le plus bas possible.

Organisme entier, sauf ci-dessous

#### *1.4.2.3.Délimitation des zones*

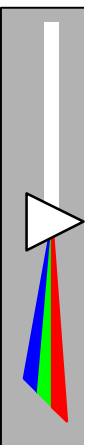
##### 1.4.2.3.1.Définition des zones

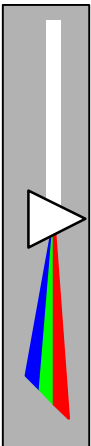
Le fait que les rayons ionisants ne soient pas perçus par les organes des sens a conduit à définir autour des sources de rayonnement des zones appelées:

- **zone surveillée** dans laquelle le risque d'exposition total est susceptible de dépasser, dans les conditions normales de travail un dixième de l'une des limites annuelles d'exposition.
- **zone contrôlée** dans laquelle le risque d'exposition total est susceptible de dépasser, dans les conditions normales de travail trois dixièmes de l'une des limites annuelles d'exposition
- **zone spécialement réglementée** et **zone interdite**, situées à l'intérieur de la zone contrôlée et dans lesquelles l'exposition totale dépasse certains seuils.

##### 1.4.2.3.2.Délimitation des zones

Le risque d'exposition totale dépend très largement des caractéristiques de chaque source de rayonnements et des conditions habituelles de travail. Son appréciation est en général fondée sur des conventions sévères qui sont une garantie de sécurité. Le niveau





d'exposition constaté dans la pratique reste dans la quasi-totalité des cas très inférieure au seuil réglementaire de délimitation.

Dans le cas du seul risque d'exposition externe, la délimitation de la zone contrôlée repose sur la valeur du débit équivalent horaire. Par exemple, pour une zone d'exposition permanente de 2000 heures par an, on aura en limite de la zone contrôlée, pour une zone attenante surveillée:

Débit équivalent de dose  $< 7.5 \mu\text{Sv}$

Les zones sont signalées par un panneau comportant un trisecteur de couleur:

- vert pour la zone contrôlée
- jaune ou orange pour la zone spécialement réglementée.
- rouge pour la zone interdite.

#### ***1.4.2.4. Protection contre l'exposition externe***

Les rayonnements issus d'une source extérieure à l'organisme ne peuvent délivrer une dose d'exposition externe que s'ils sont suffisamment pénétrants, c'est le cas des rayonnement gamma.

On doit chercher à assurer contre l'exposition externe une *protection collective* efficace complétée par une *protection individuelle* appropriée.

##### **1.4.2.4.1. Protection collective**

Elle est assurée dès la conception de l'installation sous la responsabilité du chef d'établissement, par:

- la définition et la délimitation des zones (zones surveillées, zones contrôlées, zones spécialement réglementée, zone interdite),
- la conception des installations,
- l'aménagement des postes de travail,
- la formation et l'information du personnel exposé.

##### **1.4.2.4.2. Protection individuelle**

Elle complète, sur les lieux de travail, la protection collective.

effet temps d'exposition

- Réduire la durée d'exposition grâce à une bonne préparation du programme de travail (Dose = débit de dose  $\times$  temps d'exposition )
- effet distance : Travailler à distance suffisante en utilisant, si nécessaire des instruments appropriés tels que pinces à distance ou télémanipulateur. Lorsqu'on s'éloigne de la source de rayonnement, le débit de dose diminue et inversement (Distance  $\times 2 \rightarrow$  Débit de dose  $\div 2^2$  et Distance  $\div 3 \rightarrow$  Débit de dose  $\times 3^2$ )
- effet écran : Utiliser chaque fois que possible, des écrans adaptés à la nature du rayonnement. Pour les rayonnements gamma il convient de choisir des matériaux denses tels : plomb, acier, béton. (Epaisseur du matériau  $\rightarrow$  coefficient de réduction)

Il convient de combiner ces trois moyens pour obtenir une protection maximale.

#### ***1.4.2.5. Protection contre l'exposition interne***

##### 1.4.2.5.1. Principes de protection

- Isoler ce qui est contaminé de ce qui ne l'est pas.
- On ne neutralise pas la contamination, on ne fait que la déplacer.

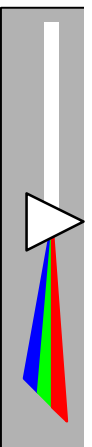
En conséquence, il convient :

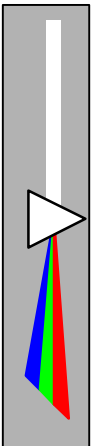
- de ne pas ignorer la présence du danger (balisage).
- d'éviter aux substances radioactives d'entrer en contact avec l'organisme humain.
- d'éviter de disséminer la contamination radioactive.

##### 1.4.2.5.2. Protection collective

Elle est assurée dès la conception de l'installation par

- la définition des zones.
- l'organisation et l'aménagement des locaux.
- l'acquisition de l'équipement de manipulation adaptés.
- la gestion des déchets.
- - la formation et l'information du personnel exposé.





#### 1.4.2.5.3. Protection individuelle.

- Utiliser des tenues de travail adaptées.
- Respecter les interdictions de boire, manger, fumer...
- Ne pas pénétrer en zone contrôlée avec une blessure ouverte non protégée.
- Ne pas séjourné inutilement dans un milieu contaminé.
- Procéder en quittant le service au contrôle de contamination corporelle.

#### *1.4.2.6. Surveillance individuelle de l'exposition professionnelle*

##### 1.4.2.6.1. Personnel concernés

Seul les personnels de catégorie A font l'objet d'une surveillance individuelle. Les personnels de catégorie B font l'objet d'une **dosimétrie collective** où il est vérifié le respect des 15 mSv annuels pour l'organisme entier.

##### 1.4.2.6.2. Risque d'exposition externe: la dosimétrie photographique individuelle.

La réaction de l'émulsion photographique aux rayons ionisants pénétrants se traduit par un noircissement de la surface sensible en fonction de l'équivalent de dose reçu. En connaissant la loi de conversion on peut connaître l'équivalent de dose reçu par simple mesure photométrique.

Le film dosimètre est individuel et doit être porté à hauteur de la poitrine, il est obligatoire.

##### 1.4.2.6.3. Risque d'exposition interne: examens radiotoxicologiques et Anthropogammamétrie.

Ces examens détectent la présence des radio-isotopes dans l'organisme. Le rythme de ces examens est au moins semestriel. L'interprétation est faite en référence aux limites annuelles d'incorporation fixées par le décret du 2 octobre 1986 pour chacun des radio-isotopes.

#### *1.4.2.7. Surveillance médicale*

Un travailleur ne peut être affecté ou maintenu dans un zone à risque qu'après attestation du médecin du travail.

#### 1.4.2.7.1. Surveillance médicale spéciale.

Les personnes exposées bénéficient d'une surveillance médicale spéciale:

- Un examen avant prise de fonction
- Des examens périodiques (Tous les 6 mois pour la catégorie A, tous les ans pour la catégorie B)
- Des examens de reprise destinés à déterminer leur aptitude à reprendre leur travail après certaines interruptions (par exemple suite au dépassement d'une limite d'exposition).

#### *1.4.2.8. Rôle du chef d'établissement*

C'est le chef d'établissement qui assume vis à vis de la loi la responsabilité d'appliquer la réglementation relative à la radioprotection des travailleurs.

#### 1.4.2.8.1. Mesures administratives

Il est tenu aux obligations administratives suivantes:

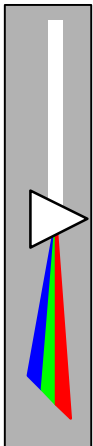
Pour les substances radioactives seulement:

- demander l'autorisation de détention de radioéléments artificiels au CIREA.
- Si nécessaire, demander l'autorisation ou faire la déclaration d'une installation classée à la préfecture du département.

Pour toutes les sources de rayonnements ionisants:

- Faire la déclaration de détention à l'inspection du travail.
- Adresser copie de la déclaration de détention au service de sécurité sociale compétent (CRAM ou MSA).
- Nommer une personne compétente en radioprotection spécialement chargée de veiller à l'application des dispositions réglementaires en vigueur et au respect des mesures de radioprotection.
- Classer le personnel en catégories A ou B.
- Informer et former les personnels exposés aux risques.
- Transmettre au médecin du travail la liste des personnels exposés.
- Tenir à jour le registre de vérification de vérification des sources de rayonnement.





#### 1.4.2.8.2.Mesures techniques

Le chef d'établissement est tenu aux obligations techniques suivantes:

- Faire assurer la surveillance individuelle des personnels exposés.
- Définir la zone surveillée et la zone contrôlée
- Assurer la protection des travailleurs contre les deux types d'exposition.
- Organiser la formation à la radioprotection des travailleurs exposés
- Faire procéder aux contrôles prévus par la réglementation.

#### 1.4.2.9.Les partenaires du chef d'établissement

Le chef d'établissement, comme nous venons de le voir assume ses responsabilités. Mais, il est aidé dans sa tâche par un certain nombre de personnes et d'organismes.

##### 1.4.2.9.1.Rôle de la personne compétente en radioprotection

Principalement, elle doit sous sa responsabilité:

- Procéder à l'analyse périodique des postes de travail.
- Participer à la formation du personnel exposé.
- Tenir la fiche des conditions de travail.
- Elaborer un plan d'intervention en cas d'accident.
- Recenser les situations susceptibles de conduire à un mode d'exposition exceptionnelles ou accidentelles des travailleurs.
- Etre apte à mettre en oeuvre un plan d'urgence et prendre les premières mesures d'urgence.

##### 1.4.2.9.2.Rôle du comité d'hygiène, de sécurité, des conditions de travail.

Le rôle général du CHS-CT est défini dans le code du travail. En ce qui concerne la radioprotection son rôle peut se définir comme suit:

- Donner son avis à l'employeur pour la délimitation des zones.
- Veiller à la formation des personnels exposés.

- Etre informer des dépassements des limites d'exposition et des études réalisées à ce sujet.
- Participer à la protection des travailleurs.

#### 1.4.2.9.3.Rôle des organismes agréés

Ils ont pour mission de:

- Réaliser des contrôles réglementaires (contrôle des sources, contrôle d'ambiance)
- Former la personne compétente à la radioprotection.
- Participer à la formation du personnel exposé.

