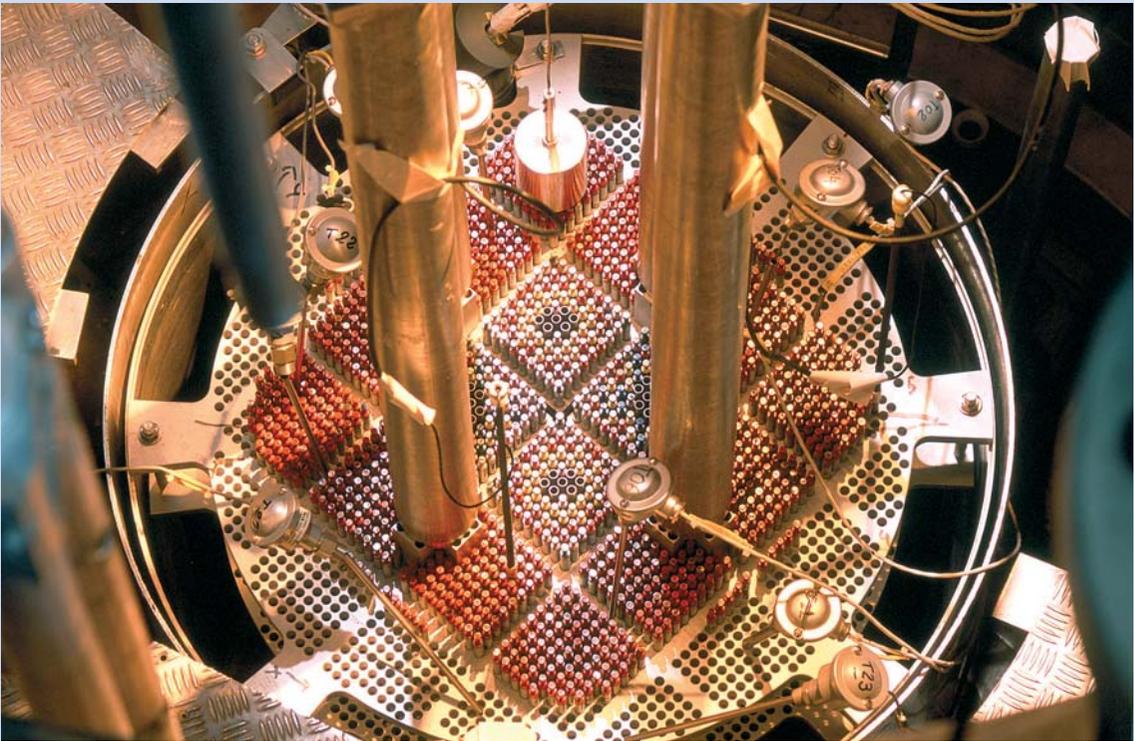


# Détection de rayonnements et instrumentation nucléaire



**Abdallah LYOUSSI**

# **Détection de rayonnements et instrumentation nucléaire**

**Vj k' r ci g' k p v g p v k q p c m { ' i g h v ' d n e p m**

GÉNIE ATOMIQUE

# Détection de rayonnements et instrumentation nucléaire

**Abdallah LYOUSSI**

Avec la contribution de : François FOULON, Serge HAAN,  
Bernard LESCOP, Loredana MANDUCI et Annick NGUYEN



17, avenue du Hoggar  
Parc d'activités de Courtabœuf, BP 112  
91944 Les Ulis Cedex A, France

Illustrations de couverture : Le réacteur expérimental EOLE, de très faible puissance, est destiné aux études neutroniques de réseaux modérés, en particulier ceux des Réacteurs à Eau Pressurisée industriels.  
© Philippe Stroppa/CEA.

Imprimé en France

ISBN : 978-2-7598-0018-6

Tous droits de traduction, d'adaptation et de reproduction par tous procédés, réservés pour tous pays. La loi du 11 mars 1957 n'autorisant, aux termes des alinéas 2 et 3 de l'article 41, d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective », et d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation intégrale, ou partielle, faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (alinéa 1<sup>er</sup> de l'article 40). Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et suivants du code pénal.

© EDP Sciences 2010

*« Whenever a nuclear physicist observes a new effect caused by an atomic particle, he tries to make a counter out of it. »*

McKAY,  
1953

**Vj ku' r ci g' l p v g p v k p c m f ' i g h v ' d r e p m**

# Table des matières

---

<b>Préfaces</b> .....	xi
-----------------------	----

## **Chapitre 1 : Introduction**

## **Chapitre 2 : Interactions des rayonnements avec la matière**

2.1.	Les différents types de rayonnements nucléaires .....	3
2.1.1.	Les particules chargées .....	4
2.1.2.	Les particules non chargées ou neutres .....	4
2.1.3.	Notions de probabilité d'interaction .....	6
2.1.4.	Conclusion .....	7
2.2.	Interaction des particules chargées avec la matière .....	7
2.2.1.	Interaction des particules chargées lourdes .....	11
2.2.2.	Interaction des particules chargées légères .....	19
2.3.	Interaction des particules non chargées avec la matière .....	26
2.3.1.	Interaction des rayonnements X et $\gamma$ .....	26
2.3.2.	Atténuation des photons X et $\gamma$ .....	35
2.4.	Interaction des neutrons avec la matière .....	39
2.4.1.	Diffusion élastique .....	40
2.4.2.	Diffusion inélastique ( $n, \gamma n'$ ) .....	41
2.4.3.	Capture radiative ( $n, \gamma$ ) .....	41
2.4.4.	Réactions nucléaires d'absorption .....	42
2.4.5.	Réaction de fission .....	43
2.5.	Exercices .....	46

## **Chapitre 3 : Détecteurs de rayonnements nucléaires**

3.1.	Caractéristiques principales des détecteurs .....	56
3.1.1.	Les paramètres propres aux dispositifs de détection et à leur mise en œuvre .....	56
3.2.	Détecteurs à remplissage gazeux .....	64
3.2.1.	Principe de fonctionnement .....	65
3.2.2.	La chambre d'ionisation .....	69
3.2.3.	Le compteur proportionnel .....	75
3.2.4.	Le compteur Geiger-Müller .....	78
3.2.5.	Conclusion .....	80

3.3.	Détecteurs à scintillation .....	80
3.3.1.	Principe de fonctionnement .....	80
3.3.2.	Les scintillateurs .....	82
3.3.3.	Propriétés des scintillateurs .....	85
3.3.4.	Le photomultiplicateur ou PM .....	86
3.3.5.	Applications des détecteurs à scintillation .....	88
3.3.6.	Exercices .....	89
3.4.	Détecteurs à semi-conducteurs .....	91
3.4.1.	Généralités .....	91
3.4.2.	Principe de fonctionnement .....	92
3.4.3.	Applications .....	96
3.5.	Détecteurs de neutrons .....	99
3.5.1.	Détecteurs à remplissage gazeux .....	99
3.5.2.	Scintillateurs .....	104
3.6.	Autres types de détecteurs .....	106
3.6.1.	Détecteurs Cerenkov .....	106
3.6.2.	Émulsions photographiques .....	106
3.6.3.	Détecteurs solides de traces .....	108
3.6.4.	Détecteurs à changement de phase .....	109
3.6.5.	Détecteurs chimiques .....	109
3.6.6.	Détecteurs thermoluminescents .....	110
3.6.7.	Détecteurs photoluminescents et détecteurs minéraux par coloration .....	111
3.6.8.	Détecteurs à activation .....	111
3.6.9.	Calorimètres, bolomètres .....	113
3.6.10.	Détecteurs à transfert de charges – Collectrons ou <i>Self Powered Neutron Detectors</i> .....	114
3.7.	Exercices .....	118
3.7.1.	Chambre à fission .....	118
3.7.2.	Compteur proportionnel à trifluorure de bore ( $\text{BF}_3$ ) .....	119
3.7.3.	Scintillateur et production de photoélectrons dans le PM .....	120

### **Chapitre 4 : Statistiques appliquées aux mesures de rayonnements**

4.1.	Généralités sur les incertitudes de mesure .....	123
4.2.	Statistiques et mesure de rayonnements .....	124
4.2.1.	Notions élémentaires de statistique .....	125
4.2.2.	Lois de distribution de probabilité dans les mesures de rayonnements .....	129

### **Chapitre 5 : Instrumentation neutronique pour le contrôle commande des réacteurs nucléaires**

5.1.	Introduction .....	139
5.2.	Détecteurs de neutrons appliqués à l'exploitation des réacteurs .....	140
5.2.1.	Compteur proportionnel à dépôt de bore .....	141
5.2.2.	Chambre d'ionisation à dépôt de bore .....	141
5.2.3.	Chambre d'ionisation à dépôt de bore compensée gamma .....	142
5.2.4.	Chambre à fission .....	143

5.3.	Chaînes de mesure .....	145
5.3.1.	Mode impulsion .....	145
5.3.2.	Mode courant .....	147
5.3.3.	Mode fluctuation .....	148
5.3.4.	Modes et régime de fonctionnement des détecteurs .....	148
5.3.5.	Vérification périodique des chaînes de mesure .....	149
5.4.	Chaînes neutroniques utilisées sur les REP .....	149
5.4.1.	Chaîne niveau source .....	150
5.4.2.	Chaîne niveau intermédiaire .....	150
5.4.3.	Chaîne niveau puissance .....	151

## ***Chapitre 6 : Exemples de méthodes de mesures photoniques et neutroniques dans l'industrie nucléaire***

6.1.	Spectrométrie gamma et X .....	156
6.1.1.	Principe physique.....	156
6.1.2.	Les détecteurs .....	157
6.1.3.	Électronique associée .....	159
6.1.4.	Acquisition et traitement du signal .....	161
6.1.5.	Domaines d'application .....	163
6.1.6.	Principales limitations .....	164
6.2.	Mesure neutronique passive .....	165
6.2.1.	Comptage neutronique total.....	165
6.2.2.	Comptage des coïncidences neutroniques .....	170
6.2.3.	Comptage des multiplicités neutroniques .....	174
6.2.4.	Conclusion .....	175

---

### ***Annexe A : Électronique associée aux détecteurs de rayonnements***

### ***Annexe B : Annales des sujets d'examens de Génie Atomique De 2003-2004 à 2009-2010***

### ***Annexe C : Corrigé des sujets d'examens de Génie Atomique De 2003-2004 à 2009-2010***

### ***Annexe D : Unités, constantes et grandeurs fondamentales en physique***

**Vj ku' r ci g' l p v g p v k q p c m f ' i g h v ' d n e p m**

# Préfaces

---

Alors que nous allons prochainement célébrer le centenaire de l'attribution à Marie Curie de son second prix Nobel, il est important de rappeler au plus grand nombre que la détection des rayonnements, et plus généralement les techniques d'instrumentation nucléaire, objets de l'ouvrage de notre collègue Abdallah Lyoussi, restent au cœur des progrès de la connaissance dans les sciences nucléaires ; progrès de la connaissance, mais aussi garants de la sûreté d'exploitation des installations nucléaires et de la protection contre les rayonnements.

De longues années durant, la capacité de conduire des expériences dans le domaine des sciences nucléaires a reposé sur la capacité de concevoir et de réaliser l'instrumentation associée. Il en allait ainsi dans l'équipe de Frédéric Joliot, au Fort de Châtillon, mais aussi, de l'autre côté de l'Atlantique, dans l'équipe de Willard Libby qui « découvrit » le carbone 14, produit naturellement sous l'effet du rayonnement cosmique, par la simple mise en œuvre d'un dispositif permettant d'en mesurer l'activité. Après avoir révolutionné la physique et la médecine, les sciences nucléaires s'apprêtaient alors à révolutionner la connaissance de l'Homme et de son environnement.

Aujourd'hui, les techniques de détection nucléaire continuent de progresser et d'apporter, au sein des expériences de physique des hautes énergies, une contribution essentielle à la recherche fondamentale et à notre connaissance de l'univers et de ses lois fondamentales, la « physique des deux infinis ». Elles nous permettent également de piloter les réacteurs nucléaires, de contrôler la dosimétrie des personnes potentiellement exposées au rayonnement, de contribuer à la santé publique dans le domaine du diagnostic et de la thérapie, d'assurer certains contrôles relatifs à la sécurité des transports, de vérifier la conformité de composants et de procédés industriels, de lutter contre la prolifération nucléaire, . . . Rien moins que tout cela, pourrait-on dire !

Il était donc essentiel qu'un manuel consacré à l'état de l'art sur ce sujet voie le jour. Il me vient en mémoire de laborieuses préparations de cours sur ce sujet, piochant ici et là des éléments épars. . . Qu'il soit l'œuvre d'un Professeur de l'Institut national des sciences et techniques nucléaires ne peut, à titre personnel, que me réjouir une seconde fois !

Je souhaite à cet ouvrage tout le succès qu'il mérite.

**Dr. Laurent TURPIN**  
*Directeur de l'Institut national des sciences et techniques nucléaires*  
**CEA/INSTN**

L'instrumentation industrielle, terme qui peut désigner l'ensemble du système de contrôle d'une activité de production, mais dont l'une des clés de la performance est la qualité de ses organes de détection ou de ses capteurs, constitue une discipline transversale qui se développe très souvent à partir des défis que constituent les grands projets scientifiques ou industriels, souvent confrontés à des environnements hostiles ou extrêmes. L'instrumentation en milieu nucléaire est de ce point de vue remarquable du fait du nombre considérable de contraintes et de facteurs d'hostilité qu'elle doit intégrer. C'est pourquoi elle mobilise une part non négligeable des activités opérationnelles et de développement de ce secteur.

Enseigner l'instrumentation ou écrire un ouvrage sur ce thème n'est jamais simple : il s'agit d'une activité qui puise sa matière dans un ensemble très divers de spécialités académiques. Ceci est particulièrement vrai dans le domaine de la détection nucléaire, qui met en jeu les nombreux phénomènes interaction rayonnement-matière dans un milieu complexe. Le risque est alors de privilégier la facilité de lecture au détriment de la rigueur ou inversement de ne pas sacrifier à cette rigueur au risque de rendre la lecture difficilement accessible à tout autre qu'un spécialiste. L'ouvrage d'Abdallah Lyoussi, chercheur au Centre d'études nucléaires de Cadarache et professeur à l'Institut national des sciences et techniques nucléaires évite, me semble-t-il, ces deux écueils. D'une part, il s'abstient de tout développement mathématique superflu mais chaque phénomène y est décrit et expliqué avec précision. Il en résulte un ouvrage de grande qualité pédagogique qui couvre le champ de la détection nucléaire et qui complète utilement un ensemble de livres traitant du sujet général de l'instrumentation et qui ne peuvent de ce fait que survoler ce thème particulier.

Depuis sa création, le Commissariat à l'énergie atomique est un acteur important de l'élaboration et de l'application des connaissances, ainsi que de leur diffusion académique. Dans le passé, tel ou tel ouvrage majeur de la production documentaire scientifique participe à une liste qui témoigne de cette ambition. Il faut remercier Abdallah Lyoussi d'y inscrire aujourd'hui sa contribution.

**Pr. Jacques ANDRE**  
***Vice-Président de l'Université de Provence***  
***Fondateur de la Filière Instrumentation***

# 1

## Introduction

---

La détection de rayonnements nucléaires passe obligatoirement par leur interaction avec le milieu détecteur. Ces interactions génèrent directement ou indirectement des charges électriques lesquelles, une fois collectées sont (pré)amplifiées et converties en signaux électriques. Cette opération est rendue possible grâce à la polarisation électrique du détecteur conduisant à l'établissement d'un champ électrique responsable du mouvement des charges produites et de leur collection.

D'une manière générale la détection et la mesure de rayonnements est un processus à plusieurs étapes comme le montre le synoptique de la figure 1.1.

Il s'agit dans un premier temps de faire interagir le rayonnement incident utile avec le milieu détecteur après qu'il ait franchi l'espace « source-détecteur ». Ces interactions sont ensuite converties en impulsions électriques qui sont traitées électroniquement et acheminées vers une unité d'acquisition et d'analyse. On obtient ainsi un premier résultat appelé grandeur brute ou *grandeur mesurée*. Celle-ci sera ensuite traitée et analysée pour être notamment utilisée pour accéder à ce qu'on appelle la *grandeur recherchée*. C'est typiquement l'exemple de la mesure d'un rayonnement de décroissance radioactive issu d'une source isotopique. Le résultat obtenu directement, à savoir un comptage ou un taux de comptage, ne permet l'accès à l'activité de la source qu'au moyen d'un traitement approprié prenant notamment en compte la sensibilité de détection, la distance source-détecteur, le bruit de fond. . . en somme l'utilisation d'une fonction de transfert qui permet de passer de la grandeur mesurée (ou à mesurer) à la grandeur recherchée (figure 1.1).

$$\text{Grandeur Recherchée} = \text{Fonction de Transfert} \otimes \text{Grandeur Mesurée}$$

La détection et la mesure de rayonnements nucléaires est donc une thématique pluridisciplinaire faisant appel à des connaissances en physique nucléaire et atomique, en interaction rayonnement-matière, en électronique, en acquisition, traitement et analyse du signal et, finalement, en statistiques et interprétation des résultats.

Dans cet ouvrage destiné aux étudiants en année de spécialisation de Génie Atomique, de l'Institut National de Sciences et Techniques Nucléaires, nous présentons les principes physiques de fonctionnement, les performances, les limitations et les domaines d'utilisation des principaux détecteurs de rayonnements nucléaires.

Le chapitre 2 rappelle les mécanismes d'interaction des différents types de rayonnements concernés avec la matière et de leurs principes physiques de base.

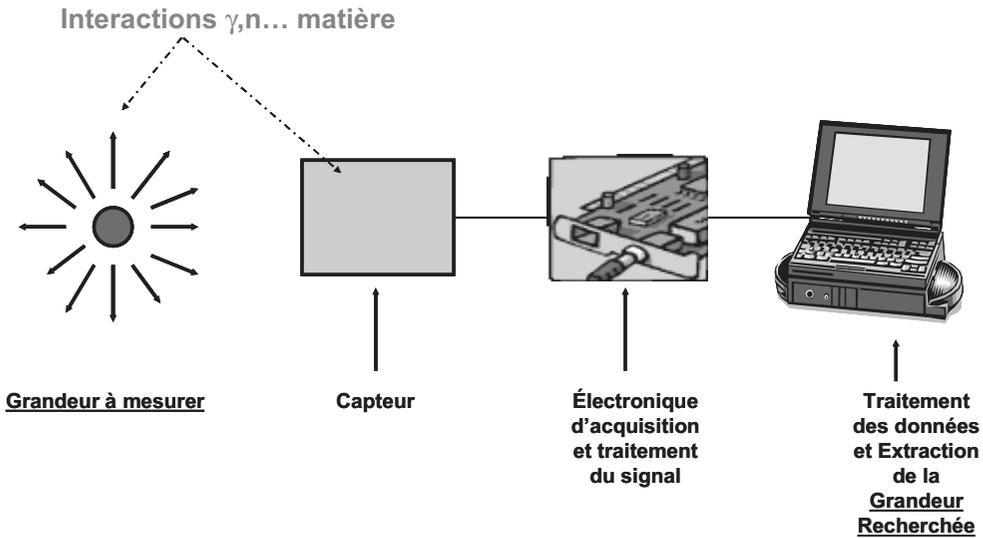


Figure 1.1. Synoptique du processus de détection et de mesure de rayonnement.

Le chapitre 3 expose le mode de fonctionnement des différentes familles de détecteurs et décrit les détecteurs de neutrons et de photons (X et  $\gamma$ ) couramment employés dans les installations nucléaires et les laboratoires de recherche.

Des notions élémentaires et indispensables de statistiques appliquées à la mesure de rayonnements font l'objet du chapitre 4.

Le chapitre 5 traite de l'instrumentation neutronique dédiée au contrôle commande des réacteurs nucléaires et des chaînes d'acquisition associées.

Enfin, dans le chapitre 6 figurent des exemples d'application et d'utilisation des détecteurs de rayonnements pour les besoins de méthodes de mesures nucléaires telles que la spectrométrie gamma, le comptage neutronique passif ou encore la mesure neutronique dans les réacteurs nucléaires de puissance de type REP (réacteurs à eau pressurisée).

Dans un ouvrage traitant de la détection et de la mesure, qui restent des notions pratiques et concrètes, il nous a semblé utile et nécessaire de proposer un ensemble d'exercices et de problèmes permettant au lecteur de tester les connaissances acquises dans les différentes rubriques et chapitres traités : des sujets d'examen de Génie Atomique avec leurs corrigés sont proposés dans les annexes B et C.

# 2

# Interactions des rayonnements avec la matière

---

La détection des rayonnements passe inévitablement par leurs interactions avec le milieu détecteur. Ces interactions génèrent directement ou indirectement des charges électriques dans le milieu détecteur. Ces charges se déplacent, sous l'effet du champ électrique produit par la tension de polarisation, vers les bornes du détecteur donnant ainsi naissance à un courant électrique. Celui-ci est ensuite (pré)amplifié et converti en impulsion électrique.

Les charges électriques ainsi produites dans le détecteur le sont via des processus d'ionisation et/ou d'excitation directs ou indirects induits par le rayonnement incident.

Ce sont par conséquent ces processus qui seront mis en relief dans ce qui suit.

## 2.1. Les différents types de rayonnements nucléaires

D'une manière générale, un rayonnement peut être défini comme *l'émission ou la propagation d'un ensemble de radiations avec transport d'énergie et émission de corpuscules* [Le Petit Larousse, édition 2009].

Il existe plusieurs types de rayonnements. À titre d'exemples les rayonnements couramment rencontrés en physique des particules ou en physique fondamentale sont les muons, les électrons, les pions, les protons, les photons, les neutrinos, les noyaux lourds... En physique nucléaire, il sera davantage question de neutrons, de photons, d'électrons, de noyaux intermédiaires ou lourds, ou plus rarement de neutrinos.

Les principales caractéristiques d'un rayonnement sont :

- Son origine : moléculaire, atomique, nucléaire, particulaire.
- Sa nature : photons, particule élémentaire, électron, nucléon, noyau lourd.
- Sa charge : négative, nulle, positive.
- Son énergie : basse, intermédiaire, haute, relativiste.
- Sa période : courte, moyenne, longue.
- Son intensité : faible, moyenne, forte.
- Le type de réactions potentiel : avec atome, noyau, nucléon...
- Sa probabilité d'interaction : faible, moyenne, élevée.

Dans le présent ouvrage il sera question de *détection de rayonnements nucléaires* c'est-à-dire de rayonnements provenant principalement de la désintégration spontanée ou provoquée de noyaux radioactifs et/ou de la désexcitation de noyaux ou d'atomes consécutive à des interactions ou réactions.

Par ailleurs, la détection d'une particule ou d'un rayonnement donné étant étroitement liée à ses modes d'interaction avec la matière notamment avec le milieu détecteur, nous distinguerons dans ce qui suit deux grandes familles : les particules chargées et les particules non chargées.

En effet, le mode d'interaction est fondamentalement différent selon que la particule est chargée ou non.

### **2.1.1. Les particules chargées**

Elles se subdivisent en deux familles : les particules chargées lourdes et les particules chargées légères.

Les particules chargées lourdes sont principalement les ions lourds et les noyaux lourds tels les produits de fission et les produits de réactions nucléaires, les particules alpha, les deutons et les protons.

Les particules chargées légères désignent ici exclusivement les électrons et les positrons. Les électrons peuvent avoir une origine atomique ou nucléaire i.e. provenant du cortège électronique des atomes du milieu ou suite à la désintégration radioactive<sup>1</sup> de noyaux (radioactivité  $\beta^+$ ,  $\beta^-$ ) respectivement.

### **2.1.2. Les particules non chargées ou neutres**

Comme leur nom l'indique, il s'agit de particules électriquement neutres représentées ici par les photons et les neutrons.

#### **2.1.2.1. Les photons**

Appelés aussi rayonnements (ou ondes) électromagnétiques, les photons ont une masse nulle, une énergie  $E$  proportionnelle à leur fréquence. Elle s'exprime donc par  $E = h\nu$  où  $h$  est appelée constante de Planck et égale à  $h = 6,626 \times 10^{-34}$  J.s<sup>-1</sup>.  $\nu$  est la fréquence d'apparition du photon exprimée en s<sup>-1</sup>. Celle-ci est directement reliée à la longueur d'onde du photon notée  $\lambda$  par  $\nu = c/\lambda$  où  $c$  est la vitesse des photons dans le vide appelée aussi célérité de la lumière dans le vide égale à  $3 \times 10^8$  m.s<sup>-1</sup>.

On définit aussi pour le photon une quantité de mouvement ou impulsion et ce malgré l'absence de masse<sup>2</sup>. Elle est notée  $P$  et s'exprime par :  $P = E/c$ .

Selon leur origine, leur mode de production ou encore leur énergie, on distingue plusieurs types de photons (figure 2.1).

<sup>1</sup> Il est à noter que des électrons et positrons peuvent être émis suite au phénomène de matérialisation ; phénomène qui peut avoir lieu au voisinage du champ électromagnétique du noyau ou plus rarement de l'électron (cf. § 2.3.1.3).

<sup>2</sup> En mécanique classique, la notion de quantité de mouvement est indissociable de la notion de masse. Elle est en effet définie pour un mobile de masse  $m$  comme le produit de sa masse par son vecteur vitesse  $\vec{v}$  :  $\vec{p} = m\vec{v}$ .

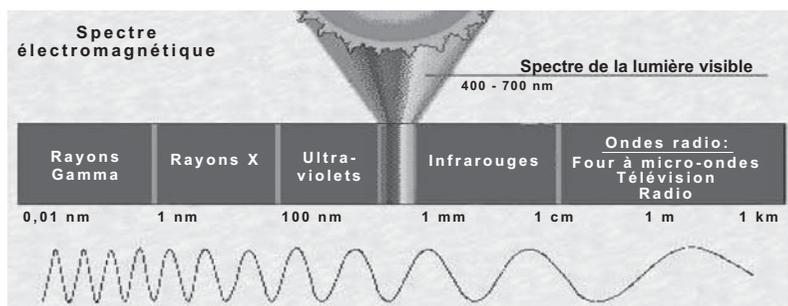


Figure 2.1. Un photon est caractérisé par son énergie ou sa longueur d'onde.

Ici, il sera essentiellement question de la détection de photons issus de réactions ou interactions atomiques ou nucléaires; à savoir les photons X, les photons gamma ( $\gamma$ ) et moins fréquemment les photons de freinage.

Les photons X sont émis suite à la désexcitation de l'atome et au réarrangement de son cortège électronique.

Les photons  $\gamma$  proviennent de la désexcitation spontanée ou provoquée du noyau de l'atome.

De par leurs processus de production et les forces et interactions mises en jeu, les énergies des photons  $\gamma$  sont en général deux à trois ordres de grandeurs supérieures à celles des photons X. Les énergies des photons  $\gamma$  sont de l'ordre de quelques millions d'électron-volts (MeV) et celles des photons X sont comprises entre quelques dizaines d'électron-volts (eV) à quelques dizaines de kiloélectron-volts (keV).

Quant aux photons de freinage appelés aussi photons de Bremsstrahlung, ils sont émis suite au ralentissement d'une particule chargée généralement légère (électron ou positron) et énergétique au voisinage du champ électromagnétique du noyau du milieu traversé. Le spectre des photons de freinage est un spectre continu allant de l'énergie zéro à l'énergie de la particule chargée incidente (cf. § 2.2.2.1).

### 2.1.2.2. Les neutrons

Avec le proton, le neutron est un des deux constituants du noyau. Le neutron se comporte donc comme un nucléon de charge électriquement nulle et de masse égale à 1 838 fois la masse de l'électron. Toutefois, malgré l'absence de sa charge, le neutron n'est pas totalement insensible à l'interaction électromagnétique de par sa distribution de densité de charge interne.

Le neutron n'est pas assujéti aux interactions coulombiennes lorsqu'il rencontre des particules chargées.

La physique du neutron appelée aussi neutronique présente ainsi des aspects originaux et variés permettant des applications qui vont de la maîtrise de l'énergie nucléaire à l'utilisation du neutron comme sonde à l'échelle microscopique (en physique de la matière condensée, dans le domaine des propriétés magnétiques, en biophysique) ou à l'échelle macroscopique (par exemple la caractérisation de colis de déchets radioactifs, le contrôle de matières nucléaires ou illicites tels les explosifs, la détection de nappes d'eau ou d'hydrocarbures dans le sol).

Enfin, son interaction avec la matière dépend étroitement de son énergie. Celle-ci varie de quelques fractions d'électron-volts notamment pour les neutrons dits thermiques<sup>3</sup> à quelques MeV voire quelques dizaines de MeV pour les neutrons rapides (cf. § 2.4).

### 2.1.3. Notions de probabilité d'interaction

Pour chaque type de rayonnement, le mode ou processus d'interaction avec la matière survient selon une probabilité d'occurrence qui est fonction de son énergie et des propriétés physico-chimiques du milieu traversé.

Cette probabilité d'occurrence d'une interaction d'un type donné entre un rayonnement incident (corpusculaire ou photonique) et une cible constituée par une particule (atome, noyau ou particule subatomique) ou un système de particules est déterminée (calculée) grâce à une grandeur ayant les dimensions d'une surface appelée *section efficace microscopique*.

Elle est définie comme étant la surface effective-apparente de l'entité cible (atome, noyau, nucléon. . .) au voisinage de laquelle une *particule* donnée à une *énergie* donnée doit se situer pour pouvoir provoquer une *réaction précise*.

Elle est notée  $\sigma$  et s'exprime en barns (1 barn =  $10^{-24}$  cm<sup>2</sup>).

La notion de section efficace est donc liée :

- au type de particules incidentes (photon, neutron, proton, électron. . .),
- à l'énergie des particules incidentes,
- au noyau de l'isotope concerné (<sup>235</sup>U, <sup>238</sup>U, <sup>239</sup>Pu, <sup>3</sup>He, <sup>10</sup>B. . .),
- au type de réaction mis en jeu (absorption, diffusion, fission. . .).

On parle alors de section efficace *microscopique* d'un *noyau donné* pour une *réaction donnée* pour un *type de particules précis* à une *énergie donnée*.

Dans le cas d'un milieu (non composite) d'une densité nucléaire  $N$  (noyaux.cm<sup>-3</sup>), on introduit la notion de section efficace *macroscopique* qu'on note  $\Sigma$  donnée par :

$$\Sigma = N\sigma \quad (2.1)$$

Où  $\sigma$  désigne la section efficace microscopique en cm<sup>2</sup>.  $\Sigma$  s'exprime en cm<sup>-1</sup> et désigne en quelque sorte le nombre moyen d'interactions par cm parcouru de la particule dans le milieu et ce, pour une énergie donnée.

On introduit enfin la notion de taux de réaction  $\tau$  défini comme étant le nombre d'interactions d'un type donné par unité de volume et par unité de temps pour une particule donnée d'une énergie donnée  $E$ .

$$\tau = N\sigma\phi \quad (2.2)$$

Où  $\sigma$  est la section efficace microscopique (en cm<sup>2</sup>) à l'énergie  $E$ ,  $\phi$  est le flux de particules incidentes (particules.cm<sup>-2</sup>.s<sup>-1</sup>) d'énergie  $E$  et  $N$  est le nombre de noyaux par cm<sup>-3</sup>.

<sup>3</sup> Un neutron thermique est un neutron en équilibre thermique avec les atomes (noyaux) du milieu dans lequel il évolue ; milieu supposé à la température de 20 °C. Cela lui confère une énergie de 0,025 eV.

## 2.1.4. Conclusion

La plupart des méthodes de détection de ces rayonnements (en intensité, en énergie ou encore en distribution temporelle) reposent sur les phénomènes d'ionisation et/ou d'excitation produits à la suite de leur interaction avec le milieu détecteur (gaz, solide ou encore liquide). Les charges ainsi créées sont collectées et dénombrées.

Les *particules chargées* ionisent le milieu détecteur par échange direct de charges avec les atomes rencontrés à l'issue d'interactions coulombiennes. Elles sont de ce fait appelées *particules directement ionisantes*.

En revanche, pour pouvoir être détectées, les particules non chargées sont dans un premier temps converties en particules chargées lourdes et/ou légères lesquelles vont ensuite, par interactions directes (ionisations et excitations) générer des charges dans le milieu détecteur.

Les particules non chargées sont ainsi appelées *particules indirectement ionisantes*.

Enfin la gamme d'énergie des rayonnements concernés ici varie des énergies les plus basses, de l'ordre du milli-électronvolt pour un neutron thermique à plus d'une centaine de millions d'électronvolts pour un produit de fission par exemple (tableau 2.1).

**Tableau 2.1. Principales caractéristiques des différents types de rayonnements concernés.**

Rayonnement	Nature	Masse	Charge	Domaine d'énergie
$\alpha$	Noyau ${}^4_2\text{He}$	$7\,340.m_e$	$+2 q_e$	3 à 10 MeV
$\beta$	$\beta^+$ : positron	$m_e$ ou $m_0$	$+q_e$	0 à qq MeV
	$\beta^-$ : électron	$m_e$ ou $m_0$	$-q_e$	0 à qq MeV
<b>Ions lourds</b>	Protons Produits de réaction Produits de fission	$m_p = 1\,836.m_e$ $\approx 4.10^4 - 2.10^5 m_e$	$+q_e$ Jusqu'à $+110 q_e$	0,1 à qq MeV qq MeV à 100 MeV
$\gamma - X$	Photon	Nulle	Neutre	qq keV à qq MeV
${}^1_0n$	Neutron	$m_n = 1\,838 m_e$	Neutre	De la fraction d'eV (0,025 eV) à qq MeV

Avec :

$$q_e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}, m_e = 0,511 \text{ MeV}/c^2, m_p = 938,3 \text{ MeV}/c^2, m_n = 939,6 \text{ MeV}/c^2.$$

## 2.2. Interaction des particules chargées avec la matière

Une particule chargée est caractérisée par plusieurs paramètres que sont :

- sa charge électrique  $Q$  en Coulomb qui est un multiple entier de la charge élémentaire :  $Q = nq_e$ ,  $n$  entier relatif ;

Donc

$$A = \frac{996,94 \times 1 + 981,4 \times 1}{2} = 989,2 \text{ Bq} \quad (33)$$

$$\frac{\Delta A}{A} = \frac{1 \times 7,97 \times 10^{-3} + 1 \times 7,92 \times 10^{-3}}{2} \quad (34)$$

Soit

$$\frac{\Delta A}{A} = 7,94 \times 10^{-3} \quad (35)$$

L'erreur absolue sur l'activité est donc :

$$\Delta A = A \times 7,94 \times 10^{-3} = 7,86 \text{ Bq} \quad (36)$$

soit :  $A = (989,2 \pm 7,9) \text{ Bq}$ .

**3. La droite d'étalonnage est :**

$$E = 0,23 \times \text{canal} - 175,77 \quad (37)$$

#### Application

L'énergie correspondante au canal 3565 est :  $E = 662,00 \text{ KeV}$ .

L'isotope est :  $^{137}\text{Cs}$ .

## C)

Voir cours.

## Détection des neutrons

a) Voir cours.

b) Voir cours.

c) Voir cours.



Bilan en énergie :

$$T_n + m_n c^2 + m_{{}^3\text{He}} c^2 = T_p + m_p c^2 + T_{{}^3\text{H}} + m_{{}^3\text{H}} c^2 \quad (40)$$

$$T_n + m_n c^2 + m_{{}^{10}\text{B}} c^2 = T_{\text{Li}} + m_{\text{Li}} c^2 + T_\alpha + m_\alpha c^2 \quad (41)$$

Pour un neutron thermique  $T_n \approx 0$  et en utilisant la chaleur de réaction  $Q$  :

$$Q_{{}^3\text{He}} = T_p + T_{{}^3\text{H}} \quad (42)$$

$$Q_{\text{B}} = T_{\text{Li}} + T_\alpha \quad (43)$$

Bilan en impulsion :

$$\vec{p}_n = \vec{p}_p + \vec{p}_{^3\text{H}} \quad (44)$$

$$\vec{p}_n = \vec{p}_{\text{Li}} + \vec{p}_\alpha \quad (45)$$

et puisque  $\vec{p}_n \approx 0$  :

$$|\vec{p}_p| = |\vec{p}_{^3\text{H}}| \quad (46)$$

$$|\vec{p}_{\text{Li}}| = |\vec{p}_\alpha| \quad (47)$$

D'où :

$$T_p = \frac{m_{^3\text{H}}}{m_p} T_{^3\text{H}} \quad (48)$$

$$T_{\text{Li}} = \frac{m_\alpha}{m_{\text{Li}}} T_\alpha \quad (49)$$

Et donc on en déduit pour la première réaction :

$$T_{\text{Li}} = 0,84 \text{ MeV} \quad (50)$$

$$T_\alpha = 1,47 \text{ MeV} \quad (51)$$

et pour la deuxième :

$$T_p = 0,573 \text{ MeV} \quad (52)$$

$$T_{^3\text{He}} = 0,191 \text{ MeV} \quad (53)$$