Il est plus facile de désintégrer un atome qu'un préjugé.
– Albert Einstein

1 Qu'est ce que la physique nucléaire ?

La physique nucléaire est née au XIX^e siècle mais marquera surtout le XX^e siècle. Elle a énormément influencé notre quotidien en particulier dans la production d'énergie et dans la culture générale populaire avec la fameuse équation d'Einstein $E = mc^2$.
Nucléaire vient du latin *nucleus* qui signifie le noyau.

1.1 Description d'un noyau

Le noyau atomique a été découvert lors des expériences de Geiger et Marden au sein de l'équipe de Rutherford, qui en donna l'interprétation en 1911. Leurs expériences mettent en évidence un système ultra-dense de nucléons au coeur de l'atome.

Définition 1 : Noyau

Un **noyau** comporte Z protons, N neutrons et A = Z + N nucléons.
Il s'écrit sous la forme : ${}^A_Z X$.
Z est nommé le **numéro atomique**, il est caractéristique de l'élément chimique. A est le **nombre de masse**.

Ce système de nucléons est soumis à une interaction attractive : l'interaction forte.
En physique moderne, nous sommes capables de définir quatre interactions fondamentales de la nature. Une comparaison en ordre de grandeur permet de comprendre quelles sont les interactions essentielles mises en jeu ici. Le médiateur correspond à une particule qui permet de modéliser l'interaction.

Interactions	Forte	Électro-magnétique (Coulomb)	Faible	Gravitation
Année de la première modélisation	1935	1873	1933	1687
Médiateur	Gluons / Mésons	Photon (γ)	Bosons $W^{\pm}$ et Z^0	Graviton ?
Portée (en mètres)	$\leq 10^{-15}$	∞	10^{-18}	∞
Intensités relatives (à l'interaction forte)	1	$\frac{1}{137}$	10^{-6}	5×10^{-40}
Radioactivité (expliquée plus loin)	α, fission	γ	β	

Le noyau concentre plus de $99,9\%$ de la masse de l'atome.

Définition 2 : Isotones

Les noyaux ayant le même nombre de neutrons (N) s'appellent des **isotones**.

Définition 3 : Isobares

Les noyaux ayant le même nombre de nucléons (A) s'appellent des **isobares**.

Définition 4 : Isotopes

Les noyaux ayant le même nombre de protons (Z) s'appellent des **isotopes**.

Plusieurs isotopes d'un même élément chimique sont naturellement présents dans l'atmosphère et sur Terre.

Par exemple, l'isotope de carbone le plus important sur Terre est le carbone ^{12}C mais l'isotope ^{14}C est très utilisé pour la datation.

De même, l'élément uranium présente deux isotopes abondants ^{235}U et ^{238}U. Le premier est utilisé dans le domaine de production énergétique.

1.2 Un pas vers la physique des particules

L'étude du noyau de l'atome, dont les caractéristiques et la structure étaient alors totalement inconnues a ouvert des perspectives insoupçonnées. Cette étude a conduit à deux disciplines séparées :

- la **physique nucléaire** qui s'attache à l'analyse des propriétés des divers noyaux
- la **physique des particules**, aussi appelée physique des hautes énergies, qui poursuit la recherche des particules élémentaires.

Depuis l'avènement de la physique quantique et de la relativité à l'aube du XX^e siècle, les découvertes sont nombreuses dans ces domaines. Tout d'abord, la théorie de Dirac de l'électron relativiste (1930) permit d'abord de prédire l'existence d'un anti-électron (aussi appelé positron), et d'un anti-proton ayant la même masse que les particules correspondantes mais de charge électrique opposée.

Néanmoins, la cohésion des noyaux soulève alors toujours de nombreuses questions. Les *forces nucléaires* apparaissent comme des forces très différentes des forces électromagnétiques. En particulier, leur très court rayon d'action explique qu'elles n'aient pas été mises en évidence par des expériences à l'échelle macroscopique. En s'appuyant sur la portée microscopique des forces nucléaires, Yukawa fut amené (1935) à prédire l'existence d'une nouvelle particule, le **méson**.

1.3 De nouveaux ordres de grandeurs

1.3.1 Les distances

La taille des atomes est de l'ordre de 10^{-10} : on définit une nouvelle unité l'Angström, $1\mathring{A}$.

La taille des noyaux est de l'ordre de 10^{-15} : on définit une nouvelle unité, le fermi : fm.

1.3.2 La masse volumique

La quasi-totalité de la masse d'un atome est concentrée dans le noyau : le nuage électronique représente une masse négligeable devant le noyau.

Pour rendre compte de la compacité d'un noyau, on peut comparer la masse d'un volume d'un centimètre cube d'atomes de fer et de noyau de fer :

— Masse d'un cm^3 d'atomes de fer : $7,9$

— Masse d'un cm^3 de noyaux de fer : $2,1\,10^{14}$

On peut trouver des objets aussi denses que les noyaux dans l'Univers : ce sont les étoiles à neutrons.

1.3.3 L'énergie

Si on compare les énergies mises en jeu au sein des atomes et des noyaux d'atomes, on observe que l'énergie de liaison des électrons au noyau est un million de fois plus petite que l'énergie de cohésion des protons et des neutrons dans le noyau.

Cette différence d'énergie explique la différence des effets d'une réaction chimique et d'une réaction nucléaire.

1.4 De nouvelles unités de mesures

1.4.1 L'unité de masse atomique

La masse d'un proton est $1,67252\,10^{-27}$. Pour éviter de manipuler des puissances de 10, on définit l'unité de masse atomique.

Définition 5 : Unité de masse atomique

L'unité de masse atomique u.m.a est définie par :

$$1u.m.a = \frac{1}{12} \times (\text{masse d'un atome}^{12}C) = 1,67252.10^{-27}kg$$

1.4.2 L'électron-volt

Définition 6 : Électron-volt

L'électron-volt est l'énergie cinétique acquise par un électron accéléré par une différence de potentiel de 1 volt.
$1eV = 1,6.10^{-19}J$

La variation de l'énergie cinétique de l'électron le long d'une trajectoire est égale au produit de la charge de l'électron par la différence de potentiel.

1.4.3 Pour aller plus loin : la définition des unités atomiques

Définition 7 : Système d'unités international

Le **système d'unités international** (SI) est basé sur trois unités fondamentales et nécessite trois étalons de mesure :

$$[\text{longueur}]_{SI} = 1m$$

$$[\text{temps}]_{SI} = 1s$$

$$[\text{energie}]_{SI} = 1J$$

Ces unités sont bien adaptées à notre quotidien, mais sont peu pratiques dans le cadre de la physique nucléaire.

En physique des particules, les systèmes étudiés mettent en jeu des particules dont les vitesses sont relativistes et dont les propriétés quantiques ne peuvent pas être négligées.

Par ailleurs, la nature fournit deux constantes pertinentes pour de tels systèmes ; la vitesse de la lumière c et $\hbar$ la constante de Planck réduite.

Rappelons que dans le système SI, ces constantes sont numériquement très grandes ou très petites :

$$c = 3 \times 10^8 m.s^{-1}$$

$$\hbar = 1,054 \times 10^{-34} Js$$

Il est par contre plus naturel d'exprimer une vitesse comme une fraction de c et un moment cinétique en unités de $\hbar$. Le moment cinétique est une quantité qui décrit un système en mouvement : dans de nombreuses configurations, il est égal à la masse de la particule multipliée par sa position et sa vitesse.

Définition 8 : Système d'unités naturelles

Le **système d'unités naturelles** (SUN) propose de suivre cette convention et d'utiliser les trois étalons de mesure :

$$[vitesse]_{SUN} = 1c$$

$$[moment \quad cinetique]_{SUN} = 1\hbar$$

$$[energie]_{SUN} = 1eV$$

Dans le système d'unités naturelles, on pose :

$$\hbar = c = 1 \tag{1}$$

2 Réactions nucléaires

2.1 Petite histoire de la radioactivité

2.1.1 L'essor de la radioactivité

Au cours de l'année 1896, Henri Becquerel (1852-1908) découvre les *rayons uraniques*, c'est-à-dire le rayonnement invisible et ionisant émis par les sels d'uranium. Après de minutieuses observations, Becquerel conclut que les sels d'uranium émettent spontanément des rayonnements invisibles qui ont la capacité d'imprimer des plaques photographiques et de ioniser la matière. Le caractère spontané et apparemment inépuisable de ces rayonnements pose une question assez délicate : si ce rayonnement transporte de l'énergie (il peut après tout ioniser la matière en arrachant des électrons), et qu'il est émis en permanence par les sels d'uranium, ceux-ci sont-ils une source infinie d'énergie ? Et plus précisément, d'où vient cette énergie ?

Les époux Curie constateront que les sels d'uranium ne sont pas les seuls composés à émettre des rayons de Becquerel : le thorium émet également un rayonnement ionisant en tout point comparable à un rayon uranique

Quelques années plus tard, la radioactivité est née : Rutherford présente les atomes comme pouvant subir des transformations subatomiques qui transforment leur nature chimique. La possibilité de transformer un atome en un autre atome est avérée explicitement.

2.1.2 La radioactivité dans la nature

La radioactivité est d'origine naturelle. L'intégralité des éléments présents sur Terre ont été formés :

— dans la phase de nucléosynthèse aux premiers instants de l'Univers pour les éléments légers (Hydrogène et Helium)

— dans les étoiles, pour les éléments jusqu'au fer

— par les explosions des étoiles pour les éléments au delà du fer.

La radioactivité est à l'origine de l'apparition de la vie sur Terre.

— C'est la chaleur qu'elle génère qui maintient le noyau terrestre sous forme liquide et qui a permis lors des éruptions volcaniques la formation de l'atmosphère primitive.

— C'est la radioactivité qui entretient la combustion au sein du Soleil.

2.1.3 La radioactivité et l'homme

Il existe des applications :

— énergétiques : centrales nucléaires à fission

— médicales : utilisateurs de traceurs radioactif pour les diagnostics, traitement des cancers

— sciences de la vie et de la terre : études in vivo à l'aide de marqueurs radioactif, datation

— militaires : bombes nucléaires à fission ou à fusion

2.2 Radioactivité

L'énergie excédentaire peut être évacuée sous différentes formes selon les processus mis en jeu. Il peut y avoir émission d'un positron, d'un proton, d'un photon ou d'une particule alpha.

Définition 9 : Particule alpha

Une **particule alpha** est constitué de deux protons et deux neutrons comme un noyau d'hélium 4. On peut donc l'écrire sous la forme : ${}_{2}^{4}\mathrm{He}^{2+}$

Les processus nucléaires pouvant produire un rayonnement observable sont de plusieurs types :

— les réactions provoquant un changement de la nature du noyau,

— les réactions permettant aux atomes d'évacuer de l'énergie excédentaire.

Définition 10 : Désintégration alpha

La désintégration alpha : le noyau expulse une particule alpha :

$$^{A}_{Z}X_N \rightarrow ^{A-4}_{Z-2} X_{N-2} + ^{4}_{2} \alpha_2$$

La radioactivité α émet un atome d'Hélium car il est plus stable que d'autres particules, en particulier ; il est plus stable que le proton.

Définition 11 : Désintégration beta +

La désintégration β^+ : le noyau expulse un positron (particule de charge $+e$ et de même masse que l'électron). Un proton du noyau se transforme en neutron et l'émission du positron s'accompagne de l'émission d'un neutrino (particule de masse très faible inconnue) :

$$^{A}_{Z}X_N \rightarrow ^{A}_{Z-1} X_{N+1} + e^+ + \nu_e$$

Le processus de désintégration β^+ apparaît presque toujours en compétition avec le processus de capture électronique dans lequel un électron e^- du cortège électronique entourant le noyau est capturé.

Définition 12 : Capture électronique

La capture électronique correspond à la transformation d'un proton du noyau en neutron

$$^{A}_{Z}X_N + e^- \rightarrow ^{A}_{Z-1} X_{N+1} + \nu_e$$

Il s'agit d'une **interaction faible** qui peut attraper un électron des couches profondes de l'atome pour transformer un proton en neutron.

Définition 13 : Désintégration beta-

La désintégration β^- : le noyau expulse un électron, c'est à dire qu'un neutron se transforme en proton et l'émission de l'électron s'accompagne de l'émission d'un anti-neutrino (particule de très faible inconnue) :

$$^{A}_{Z}X_N \rightarrow ^{A}_{Z+1} X_{N-1} + e^- + \overline{\nu}_e$$

Tout comme les atomes, les noyaux peuvent se trouver dans un état excité. La désexcitation d'un noyau $^{A}_{Z}X^{+}_{N}$ conduit à son état fondamental $^{A}_{Z}X_N$.

Cela peut s'effectuer par **conversion interne** : c'est à dire un transfert direct de l'énergie d'excitation à un électron du cortège électronique ou par émission gamma.

Définition 14 : Emission gamma

L'émission gamma se fait par transition directe si l'énergie du photon γ émis est égale à l'énergie d'excitation du noyau.

$$^A_Z X_N^+ \rightarrow ^A_Z X_N + \gamma$$

ou par cascade de rayonnements dont la somme des énergies est égale à l'énergie d'excitation

$$^A_Z X_N^+ \rightarrow ^A_Z X_N + \gamma_1 + ... + \gamma_n$$

2.3 Vallée de la stabilité

La représentation des noyaux dans un graphe (N,Z) permet de mettre en évidence la ligne de stabilité, peuplée par les noyaux stables. Ce graphe (N,Z) est appelé **diagramme de Segré**.

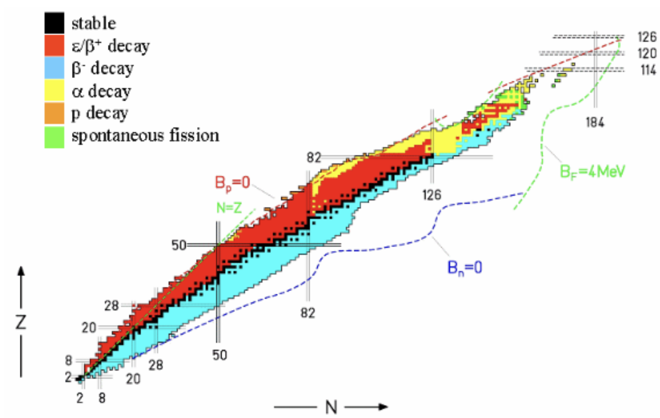

Figure 1 – Graphe (N,Z) et courbe de stabilité

Les noyaux instables, vont par une suite de désintégrations radioactives, se transformer jusqu'à devenir stables.

— au dessous des noyaux stables, on trouve en bleu les noyaux trop riches en neutrons. Ces noyaux reviennent vers la ligne de stabilité par désintégration β^-, qui transforme au sein du noyau un neutron en proton.

— au dessus des noyaux stables, on trouve en rouge les noyaux trop riches en protons. Ces noyaux reviennent vers la ligne de stabilité par désintégration β^+ ou par capture électronique, qui transforme au sein du noyau un proton en neutron.

— les noyaux lourds riches en protons sont revenir vers la ligne de stabilité par désintégration α.

— les noyaux très lourds se fissionnent en donnant naissance à des produits de désintégration légers.

— les points blancs correspondent à des noyaux jamais observés.

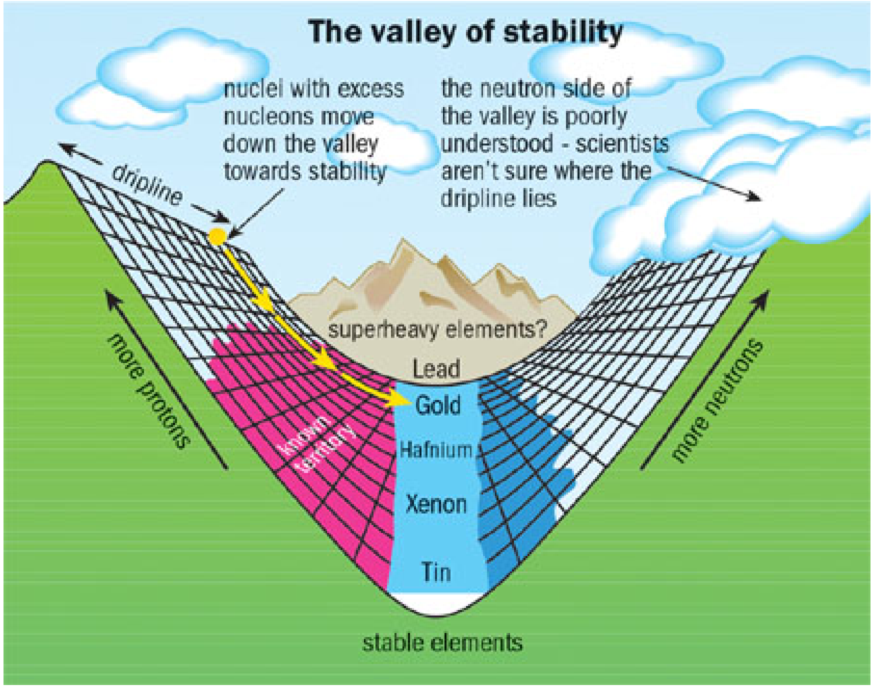

Figure 2 – Vallée de la stabilité

Une représentation en 3D où le troisième axe représente la masse des noyaux, permet d'illustrer les transformations nucléaires jusqu'à atteindre l'état de stabilité maximal, en fond de vallée.

Si on veut aller plus loin, on peut visionner le petit film du CEA ici

2.4 La fission

Pour fissionner, un noyau lourd doit se déformer. A faible déformation, l'interaction forte, attractive, prédomine tandis qu'à grande déformation l'interaction coulombienne répulsive entre deux noyaux fils prédomine.

Il y a donc une barrière de fission, en fonction de la déformation du système qu'il faut surmonter pour donner lieu à la fission.

La fission peut être spontanée ou induite par une particule.

2.4.1 Les réactions en chaîne

La fission nucléaire a beau dégager beaucoup d'énergie, elle concerne peu de noyaux atomiques. Si elle se limitait à celle de quelques noyaux d'uranium-235 ou plutonium-239 l'énergie libérée resterait encore très petite. Par contre, si la réaction concerne un très grand nombre de noyaux, c'est à notre échelle que se manifestera ce grand dégagement d'énergie.

C'est le phénomène de réaction en chaîne qui est utilisé dans les réacteurs et les armes nucléaires pour générer un grand nombre de fissions. Dans un réacteur la propagation des fissions se fait d'une manière contrôlée, dans un arme nucléaire d'une façon incontrôlée, explosive.

Définition 15 : Réaction en chaîne

Deux à trois neutrons accompagnent en moyenne les produits de fission. Si un de ces neutrons secondaires est absorbé par un noyau fissile, il peut y déclencher une seconde fission, source de nouveaux neutrons. C'est le principe de la **réaction en chaîne**.

2.5 La fusion

Définition 16 : Fusion nucléaire

La **fusion nucléaire** est le processus par lequel deux noyaux atomiques légers s'unissent pour en former un seul plus lourd en libérant une grande quantité d'énergie.

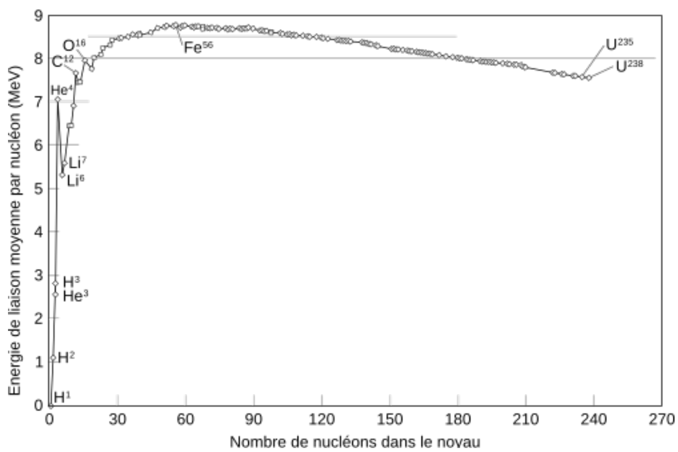

Figure 3 – Courbe d'Aston : représentation de l'énergie de liaison moyenne par nucléon en fonction du nombre de nucléons dans le noyau

La fusion exo-énergétique est possible pour tous les atomes à gauche du fer Fe dans la courbe d'Aston. La courbe d'Aston prédit que le fusion de deux noyau léger libère encore plus d'énergie que la fission nucléaire. En effet, le bilan énergétique d'un fusion est :

$$E_f - E_i = E(\text{élément lourd}) - E(\text{éléments légers}) < 0$$

La fusion d'éléments légers est **exo-énergétique**, c'est à dire qu'elle libère de l'énergie. En revanche, la réaction de fusion pour les noyaux plus lourds absorbe de l'énergie au lieu d'en libérer.

Les avantages sont :

— l'abondance des éléments légers comparés à ceux nécessaires à la fission
— l'absence de la très grande variété de déchets contrairement à la production d'énergie par fission
— la plus grande énergie libérée par nucléon

2.5.1 La fusion stellaire

Le rayonnement du Soleil s'obtient par une succession de réactions de fusion d'éléments légers, initiée par une réaction de fusion par interaction faible :

$$p + p \rightarrow^2_1 d + e^+ + \nu$$

2.5.2 La fusion sur Terre

Pour parvenir à la réaction de fusion (qui suppose l'interaction forte), il est nécessaire en premier lieu de vaincre la répulsion coulombienne pour rapprocher les protagonistes à des distances de l'ordre du fermi 10^{-15}, ce qui suppose d'atteindre des températures de l'ordre de $10^9 K$.

Deux méthodes sont alors proposées :

— la **fusion inertielle** en comprimant le mélange avec des lasers de très haute puissance

— la **fusion par confinement magnétique**

Néanmoins, ces méthodes sont encore en cours de développement mais les avancées de la recherche actuelle sont encourageantes.

2.6 Défaut de masse

Lors d'une réaction nucléaire spontanée, la masse des particules dans l'état initial est supérieure à la masse des produits de désintégration.

Définition 17 : Différence de masse

La **différence de masse** entre m_i la masse de la particule initiale et m_f la masse de la particule finale est donnée $\Delta m = m_f - m_i$. De manière plus générale, si plusieurs particules sont en jeu, il faut sommer les masses des particules :

$$\Delta m = \sum_{\text{Particules formées}} m_{\text{particules}} - \sum_{\text{Particules initiales}} m_{\text{particules}}$$

Propriété 1 : Défaut de masse

Le **bilan d'énergie de masse** de la désintégration : $Q = \Delta m \times c^2$, où c est la célérité de la lumière dans le vide.

Par exemple, la masse d'un noyau est plus faible que la masse totale de ses nucléons pris séparément. Comment l'expliquer ? En 1905, en posant les fondements de la théorie de la relativité, Albert Einstein développe la notion d'équivalence masse-énergie.

Propriété 2 : Équivalence masse-énergie

Tout corps au repos, du fait de sa masse, possède une **énergie de masse**, donnée par :

$$E_{\text{masse}} = mc^2$$

où c est la vitesse de la lumière.

Si on imagine à présent la formation d'un noyau à partir de ses nucléons initialement séparés, une partie de l'énergie de masse initiale est consacrée à la cohésion des nucléons. L'énergie de masse du noyau est donc plus faible que celle des nucléons séparés.

Méthode 1 : Calcul du défaut de masse

Supposons que nous voulions calculer le défaut de masse d'un noyau atomique.

— On commence par dénombrer le nombre de protons (Z) et de neutrons (A-Z) dans le noyau.

— On calcule la masse totale des nucléons :

$$m_{\text{nucléon}} = Z(m_{\text{protons}}) + (A - Z)(m_{\text{neutron}})$$

— On compare cette valeur à la masse du noyau.

$$\Delta m = m_{\text{noyau}} - m_{\text{nucléons}} < 0$$

3 Evolution d'une population de noyaux

3.1 Caractère probabiliste

Définition 18 : Constante radioactive

La probabilité que présente un noyau radioactif de se désintégrer pendant l'unité de temps s'appelle la **constante radioactive**, notée λ.

Elle s'exprime comme l'inverse d'un temps, en s^{-1}.

Ce caractère probabiliste fait qu'on ne connaît jamais le moment où un noyau donné va se désintégrer.

En revanche, on peut prévoir statistiquement (sur une population de noyau) l'évolution du nombre de noyaux.

Attention : On appelle cette quantité une constante de temps car elle ne dépend pas du temps, ni de l'environnement considéré. Nonobstant, elle varie selon l'élément radioactif considéré.

3.2 Loi de décroissance radiocative

Propriété 3 : Décroissance radioactive

Dans un échantillon de matière radioactive constitué de noyaux radioactifs d'une espèce donnée, le nombre de noyaux, N(t), va décroître au cours du temps selon une loi exponentielle décroissante :

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

en notant N_0 le nombre de noyaux présents à l'instant choisi comme origine des temps.

Démonstration :

Intéressons nous à la description d'un système pendant un petit intervalle de temps dt, très inférieur à la durée caractéristique d'évolution du nombre de noyaux.

Pendant ce petit intervalle très court, on peut assimiler toute courbe à sa tangente, c'est à dire à une droite affine : c'est ce qu'on appelle la **linéarisation** du problème.

A un instant t, le nombre de noyaux radioactifs est $N(t)$.

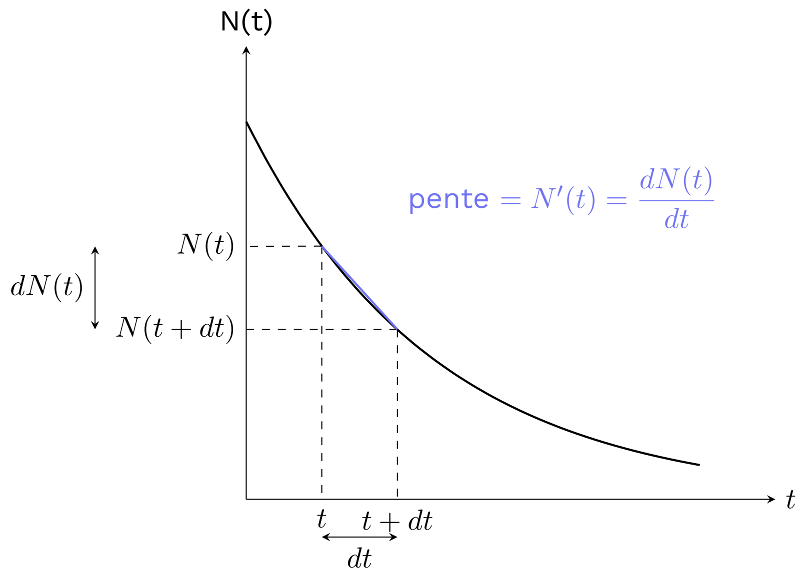

Figure 4 – Représentation graphique de l'évolution du nombre de noyaux en fonction du temps et linéarisation

Par définition de la constante radioactive, la probabilité qu'un noyau se désintègre pendant la durée dt est $\lambda \mathrm{d}t$. Pour l'ensemble des noyaux, le nombre moyen de noyaux : $N(t)\lambda \mathrm{d}t$.

$$N(t) = N(t+\mathrm{d}t) + \lambda N(t)\mathrm{d}t \Longleftrightarrow N(t+\mathrm{d}t) - N(t) = -\lambda N(t)\mathrm{d}t \tag{2}$$

Or, $dN(t) = N(t+\mathrm{d}t) - N(t)$ est la variation infinitésimale du nombre de noyaux pendant dt.

$$\frac{dN(t)}{\mathrm{d}t} = -\lambda N(t) \tag{3}$$

On reconnaît dans le membre de gauche une dérivée de la fonction N par rapport à t. Ainsi, la fonction (du temps) N est solution de l'équation différentielle du premier ordre à coefficients constants : $y' = ay$ dont on connaît les solutions : $y(t) = B\mathrm{e}^{at}$.

Ici $a = -\lambda$ et la constante est déterminée avec la condition initiale en 0 : $N(t) = N_0 \mathrm{e}^{-\lambda t}$.

Pour aller plus loin : la séparation des variables

Nous présentons, dans ce paragraphe, une méthode pour intégrer l'équation différentielle, c'est à dire la résoudre et trouver l'expression $N(t)$. Il est tout à fait possible de raisonner comme précédemment, en connaissant la forme des solutions des équations différentielles du premier ordre. Néanmoins, nous proposons ici une méthode plus générale qui sera revue en études supérieures.

Cette méthode est nommée la séparation des variables car nous "séparons" la dérivée comme deux différentielles : une différentielle sur le temps et une différentielle sur le nombre de noyaux.

$$dN = -\lambda N dt$$

Ensuite, on sépare effectivement les variables en plaçant toutes les variables N du côté de la différentielle de N et réciproquement de l'autre côté pour le temps.

$$\frac{dN}{N} = -\lambda dt$$

Comme nous avons un élément différentiel dans chaque membre de l'égalité, on peut intégrer cette équation. Il faut veiller à ce que les bornes soient cohérentes :

$$\int_{N(0)=N_0}^{N(t)} \frac{dN}{N} = -\lambda \int_{t'=0}^{t'=t} dt'$$

Il faut faire attention à nommer différemment la variable muette d'intégration (ici t') et la valeur finale du temps (t).

$$\ln(N(t)) - ln(N_0) = -\lambda t \iff \ln\left(\frac{N(t)}{N(0)}\right) = -\lambda t) - \iff N(t) = N_0 \exp\{-\lambda t\}$$

3.3 Période radioactive

Définition 19 : Période radioactive

La **période radioactive**, T, ou le temps de demi-vie, est le temps au bout duquel le nombre de noyaux initialement présent a été divisé par un facteur 2. $N(T) = \frac{N_0}{2}$, où N_0 est la quantité initiale de noyaux présente dans l'échantillon.

Propriété 4 : Division par deux du nombre de noyaux radioactifs

Quelque soit l'instant t considéré, on a aussi : $N(t+T) = \frac{N(t)}{2}$. Après une période radioactive, le nombre de noyaux radioactifs encore présents a été divisé par deux.

Nous pouvons faire une analogie de la période radioactive avec le **temps de demi-vie**, défini en cinétique chimique, comme la durée nécessaire pour que la moitié du réactif limitant soit consommé.

Propriété 5 : Temps de demi-vie

T et λ sont reliés : $T = \frac{\ln(2)}{\lambda}$

Démonstration :

Par définition du nombre de noyau présents dans l'échantillon à un instant t, appliquée en $t = T$, il vient

$$N(T) = N_0 \mathrm{e}^{-\lambda T}. \tag{4}$$

Par définition de la période radioactive, cette expression est aussi égale à $N(T) = \frac{N_0}{2}$.
On en déduit :

$$\mathrm{e}^{-\lambda T} = \frac{1}{2} \iff \mathrm{e}^{\lambda T} = 2 \tag{5}$$

Par composition par la fonction logarithme népérien : $\lambda T = \ln(2)$.

3.4 Activité d'une source

Définition 20 : Activité

L'**activité**, noté $a(t)$, est le nombre de désintégration par unité de temps.

$$a(t) = -\frac{dN}{dt}$$

Propriété 6 : Activité d'une source

L'activité est le produit du nombre de noyau par la probabilité qu'un noyau se désintègre par unité de temps λ :

$$a(t) = \lambda N(t) = a_0 \mathrm{e}^{-\lambda t}$$

avec $a_0 = N_0 \lambda$

L'activité s'exprime en Becquerel (Bq) qui correspond à une désintégration par seconde. Une ancienne unité historique est le Curie qui correspond à $3,7.10^{16}$ Bq.

4 Plonger au coeur du noyau, plonger aux fondements de la physique

4.1 Les dimensions

Définition 21 : Unité

Toute grandeur physique s'exprime avec son unité. Toute unité s'exprime en fonction d'un produit de puissance des unités de base.

Les dimensions sont la longueur (L), la durée (T), la température (θ), la masse (M), l'intensité du courant électrique (I), l'intensité lumineuse (J) et la quantité de matière (N).

On dit qu'une grandeur est sans dimension si son unité ne représente pas un produit de puissance de ces unités de base : c'est le cas des angles qui ont bien une unité (le radian, les degrés...) mais qui n'ont pas de dimension.

En physique classique, les lois sont indépendantes du système de mesures et doivent vérifier des propriétés d'homogénéité :

— Toute relation entre grandeurs physiques est indépendante du système d'unités de mesure.

— Toute relation entre des grandeurs physiques est dimensionnellement homogène.

Propriété 7 : Calcul aux dimensions

On ne peut additionner ou soustraire que des grandeurs ayant la même dimension.
Le produit de deux grandeurs a pour dimension le produit des dimensions de ces grandeurs.

Nous devons toujours, lorsque nous donnons un résultat, vérifier l'homogénéité de la formule annoncée.

Les quatre dimensions qui nous intéressent le plus souvent sont : L, la longueur, T, le temps, M, la masse et θ, la température.

Méthode 2 : Trouver la dimension d'une grandeur

Deux possibilités :

— Si on connaît l'unité de la grandeur ou qu'elle est indiquée dans l'énoncé, nous pouvons en déduire sa dimension.
Par exemple, l'énoncé indique $\mathcal{G} = 6,67430 \times 10^{-11} m^3.kg^{-1}s^{-2}$. Nous en déduisons la dimension $[\mathcal{G}] = L^3.M^{-1}.T^{-2}$.

— Si on ne connaît pas l'unité d'une grandeur, il faut utiliser une formule ou une loi physique connue.
Par exemple, l'intensité du champ de pesanteur terrestre intervient dans l'expression du poids. On sait donc, d'après la deuxième loi de Newton, que : $mg = ma \Longleftrightarrow g = a$. Ainsi, g a la dimension d'une accélération. Soit : $[g] = L.T^{-2}$.

Attention : Une formule inhomogène est toujours signe d'une erreur ! Néanmoins, une formule homogène n'est pas toujours juste !

Méthode 3 : Vérification de l'homogénéité d'une formule

Supposons qu'à la fin d'un exercice, nous obtenions une relation de la forme $mv = \rho g R^2 L$. Nous souhaitons vérifier que cette formule est dimensionnellement correcte.

1. On commence par lister les grandeurs, à noter leurs unités et à en déduire les dimensions :
   — m, une masse en kg : M
   — v, une vitesse en $m.s^{-1}$: $L.T^{-1}$
   — ρ, une masse volumique en $g.cm^{-3}$: $M.L^{-3}$
   — g, l'intensité de la pesanteur en $m.s^{-2}$: $L.T^{-2}$
   — R, le rayon en m : L
   — L, une longueur en m : L
2. On calcule ensuite la dimension de chacun des membres de l'équation.
   — $[M.L.T^{-1}]$ pour le membre de gauche
   — $[M.L^{-3}.L.T^{-2}.L.L.L] = [M.L.T^{-2}]$ pour le membre de droite.
3. On conclut. Comme les deux membres n'ont pas les mêmes dimensions, la formule n'est pas correcte.

4.2 L'analyse dimensionnelle au service des lois physiques

Quand on sait estimer quelles sont les grandeurs et variables nécessaires à la description d'un problème, on peut raisonner par analyse dimensionnelle pour lier entre elles ces variables et obtenir une loi d'échelle.

Propriété 8 : Théorème de Vaschy Buckingham aussi appelé théorème Pi

Soit A_1, A_2... A_n, A grandeurs physiques et $[A_1], ...[A_k]$ un système d'unités indépendantes que l'on a choisit de telle sorte à ce que $[A], [A_{k+1}], ..., [A_n]$ s'exprime en fonction de ce système d'unités. S'il existe une loi physique de la forme $a = f(a_1, ..., a_n)$ entre les $n+1$ grandeurs, alors on peut la mettre sous la forme d'une loi impliquant $n-k+1$ grandeurs sans dimensions.

Ce théorème permet d'écrire de façon très générale une loi physique, comme une fonction inconnue dépendant de nombres sans dimension. Il est souvent très utilisée en mécanique des fluides.

Méthode 4 : Obtenir la forme générale par analyse dimensionnelle

Nous voulons obtenir la loi de la gravitation, c'est à dire l'expression de la force qui s'exerce entre deux corps massifs (m_A et m_B) séparés d'une distance r.

1. On commence par lister les grandeurs susceptibles d'intervenir dans le problème. C'est ici qu'intervient notre sens physique dans le choix des grandeurs pertinentes. On commence toujours par la grandeur qu'on souhaite exprimer : F. On ajoute les paramètres du problème : m_A, m_B et r. Ensuite, on se questionne sur d'autres grandeurs qui pourraient avoir un impact sur notre équation. A priori la vitesse de la lumière ou la constante des gaz parfaits n'ont aucune raison d'intervenir ici. En revanche, la constante de gravitation $\mathcal{G}$ est pertinente.
2. On indique ensuite toutes les dimensions des quantités utiles dans un tableau.
3. On compte ensuite le nombre de grandeurs (n+1) et le nombre de dimensions (k).
   Ici, on a 5 grandeurs (dont celle d'intérêt) donc $n+1=5$ et 3 dimensions. Il existe donc deux nombres sans dimension.
4. On cherche à construire des nombres sans dimension. Plusieurs possibilités existent, on ne peut pas se tromper.
   Ici, on peut proposer $\frac{m_A}{m_B}$ et $\frac{Fr^2}{Gm_A^2}$.
5. On écrit la forme générale en introduisant une fonction f quelconque : $F = \frac{Gm_A^2}{r^2} f(\frac{m_A}{m_B})$

Grandeur	Force (F)	Masse A (m_A)	Masse B (m_B)	Distance (r)	Constante de gravitation ($\mathcal{G}$
Dimension	$M.L.T^{-2}$	M	M	L	$L^3.M^{-1}.T^{-2}$

Dans ce cas où l'on connaît la réponse, on vérifie bien que pour $f : x \mapsto \frac{1}{x}$, on obtient le résultat attendu.

Préparation aux olympiades – version 2025-26 – contributeur·ice·s : Loïse Launay
Sources des figures : **1** *Cours de radioactivité, Yannick Arnoud* **2** *Résultats et simulation en spectroscopie des noyaux déformés : cas des noyaux isomériques et tétraédriques Aurélie Vancraeyenest*