

1 Isotopes

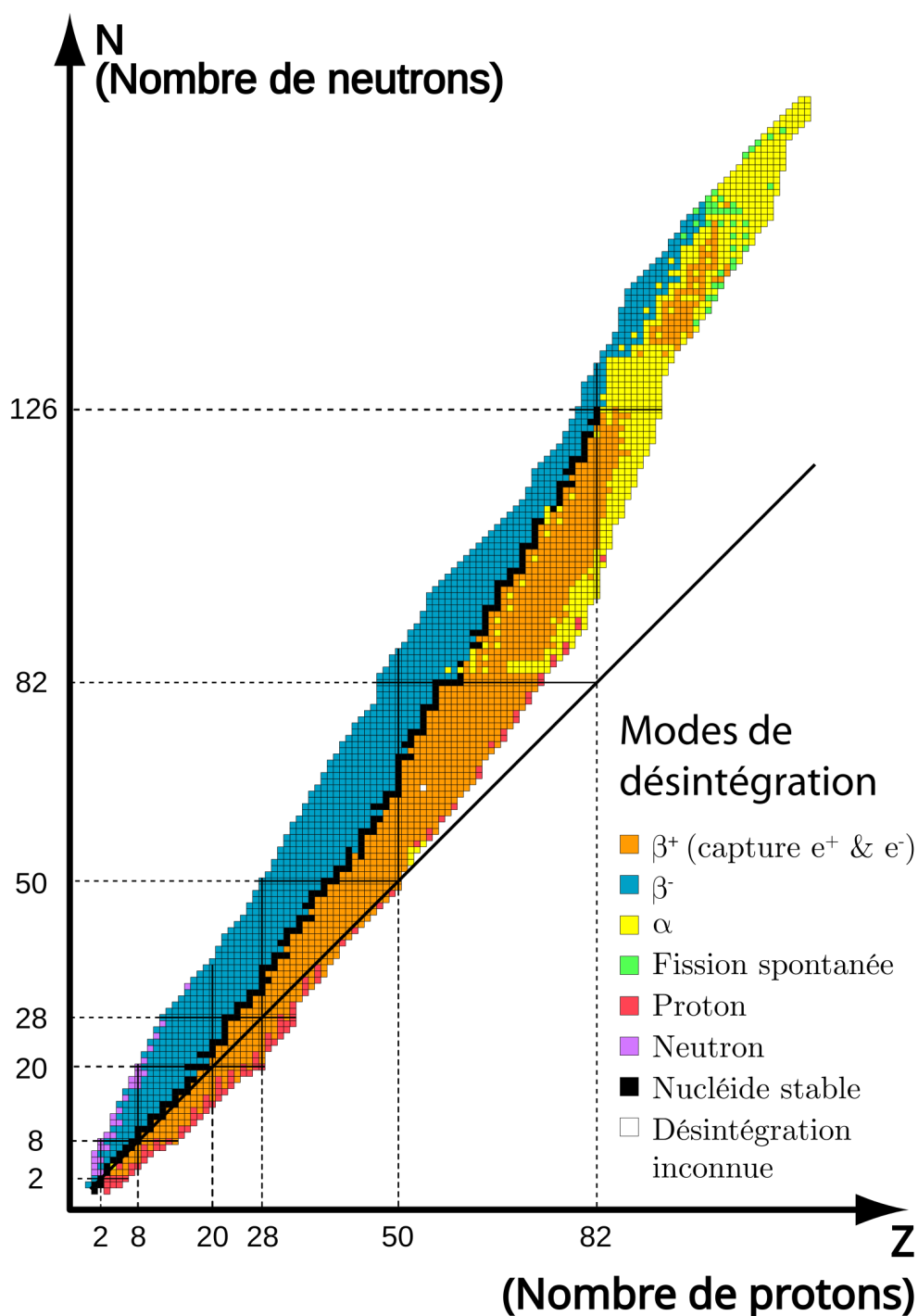


FIGURE 1 – Les isotopes

Un **atome** est le plus petit élément de la matière. Il est composé de **particules**, soit de **protons**, de **neutrons** et d'**électrons**. Les protons et les neutrons sont aussi appelés des **nucléons**. L'agglomération de protons et de neutrons constituent le **noyau**. Les électrons tournent autour du noyau sur des couches définies. Les caractéristiques des atomes dépendent de leur charge, de leur masse atomique et du nombre d'électrons sur les couches les plus externes.

1.1 Proton

Les protons sont chargés positivement. Le numéro atomique (Z) correspond au nombre de protons. La masse d'un proton vaut 1 uma (unité de masse atomique).¹

1.2 Électron et positon

Les **électrons** sont chargés négativement. La masse d'un électron est négligeable et vaut $1/1850$ uma. Une variation du nombre d'électrons autour du noyau produit des **ions**. Les couches électroniques sont très éloignées du noyau de l'ordre de 100.0000 par rapport à la taille du noyau. Un atome est donc principalement constitué de « vide ».

Les **positons** sont des électrons chargés positivement.

1.3 Neutron

Les neutrons n'ont pas de charge. Le nombre de masse atomique (A) correspond à la somme de protons et des neutrons. Le nombre de neutrons (N) est donc $A - Z$. Le nombre de protons et de neutrons tend à être égal au sein d'un noyau.²

Cependant, de nombreux atomes acceptent des neutrons surnuméraires (ou ont moins de neutrons que de protons, mais cette situation est plus rare). On appelle ces formes d'atomes des **isotopes**. Certains isotopes sont stables, c-à-d qu'il conserve leur nombre de neutrons et de protons. D'autres isotopes sont instables, c-à-d qu'ils peuvent **transmuter** en produisant de nouveaux atomes en émettant des particules radioactives. On appellera ces isotopes des radio-isotopes.

2 Interactions au sein d'un atome

Si un isotope est stable, c'est que l'ensemble des interactions³ au niveau du noyau⁴ s'équilibre.

A l'inverse, un isotope instable sera un isotope dont les interactions au sein du noyau ne s'équilibrent pas à terme.

Les neutrons permettent de conserver la cohérence du noyau en liant les protons entre eux, alors qu'ils ont tendance à se repousser par leur charge électrostatique.

2.1 Interactions électriques et magnétiques

Comme vu au cours de Physique de 5^{ème}, il est possible de calculer les interactions entre particules tant sur le plan magnétique (électron/proton, par exemple) que sur le plan électrique (proton/proton, par exemple).

Les interactions électriques sont inversement proportionnelles au carré de la distance ($F_e l = k_{el} \times \frac{q_1 \times q_2}{d^2}$). Elles interagissent donc loin du noyau (dont la taille est d'un ordre de grandeur de $10^{-15}m$).

Il doit donc exister une interaction qui stabilise le noyau constitué de protons qui se repoussent l'un et l'autre.

1. L'uma est définie comme étant la masse d'un carbone 12 ($^{12}_6C$) divisé par 12.

2. Plus le noyau est lourd, plus il tend à accepter des neutrons surnuméraires.

3. On privilégiera le terme d'« interaction » par rapport au terme de « force », car il est plus neutre en terme sémantique.

4. On négligera les effets des électrons trop éloignés.

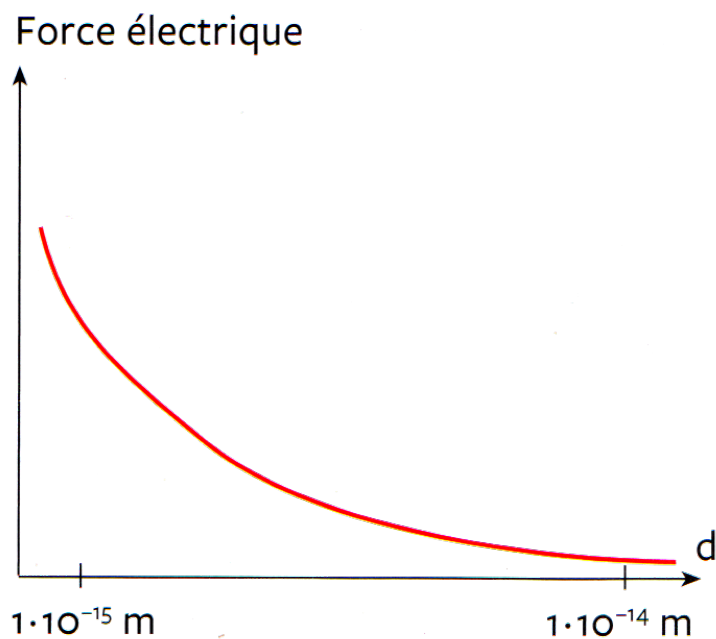


FIGURE 2 – Évolution de la force électrique avec la distance

2.2 Interaction nucléaire forte

L'interaction qui maintient stable le noyau est l'**interaction nucléaire forte**. Elle agit entre nucléons (donc aussi bien les protons que les neutrons).

Cette interaction agit sur de très courte distance et décroît rapidement.

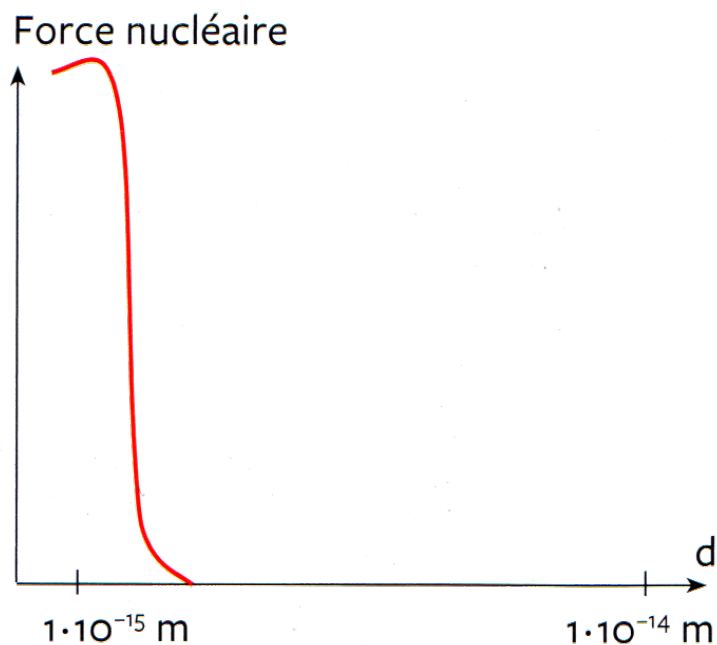


FIGURE 3 – Évolution de l'interaction nucléaire forte avec la distance

3 Stabilité du noyau

Étant donné la force d'interaction forte, plus le nombre de nucléons est important, plus cette force d'interaction est importante. Mais également, plus le nombre de nucléons est important, plus la distance entre nucléons est importante, et donc cette interaction diminue pour les nucléons périphériques.

Il existe donc un nombre de nucléons qui donne une stabilité maximale. S'il n'y a pas assez de nucléons, il y aura une instabilité. Mais s'il y a trop de nucléons, cette instabilité se marquera également.

L'atome le plus stable est l'atome de fer (Fe).

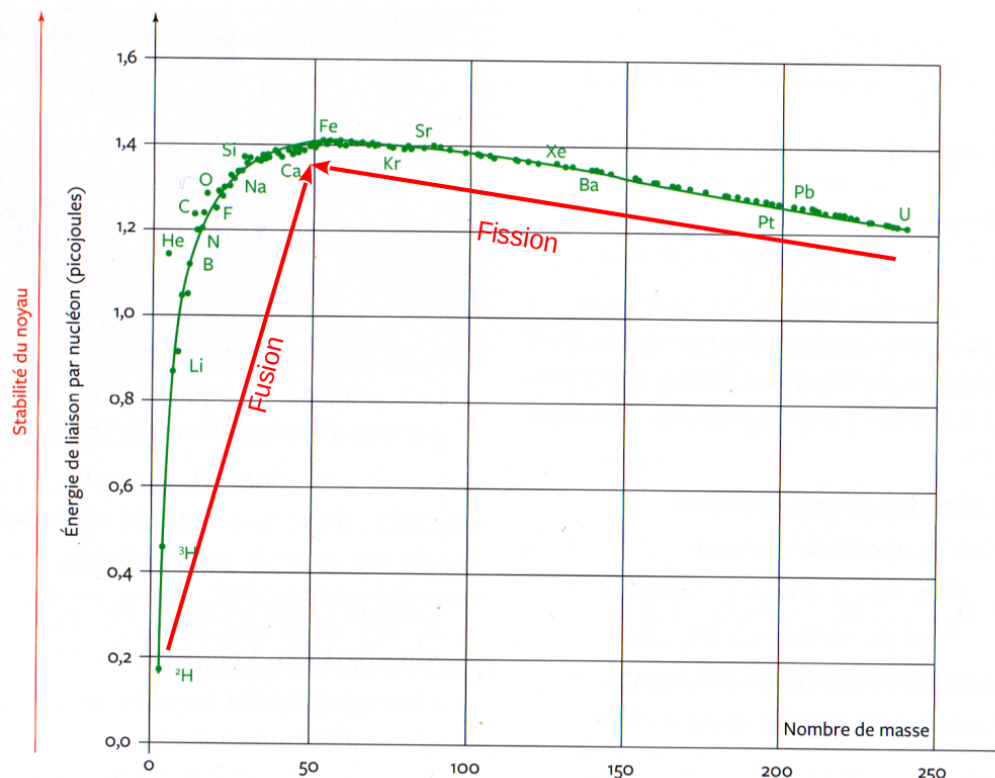


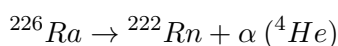
FIGURE 4 – Diagramme de Aston (Masse/Stabilité)

4 Rayonnement lié à une désintégration

4.1 Rayonnement alpha

Le rayonnement alpha (α) est l'émission de 2 protons et 2 neutrons, soit l'émission d'un noyau d'Hélium (He^{2+}). Comme ce noyau est chargé, il est dévié en présence d'un champ magnétique.

L'exemple le plus courant est la désintégration du radium (Ra) en Radon (Rn).



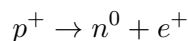
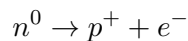
Du fait, de la masse du noyau d'hélium, la vitesse de ce rayonnement est beaucoup plus lente ($25.000 \frac{km}{s}$) et peu pénétrante quelques centimètres d'air ou une feuille de papier. Cependant, le rayonnement α est très ionisant, il est donc très toxique, même si son effet à distance est faible.

4.2 Rayonnement bêta

Il existe deux types de rayonnement bêta (β) :

- le rayonnement bêta négatif (β^-) qui émet un électron (e^-) ;
- le rayonnement bêta positif (β^+) qui émet un électron positif ou **positon** (e^+)⁵.

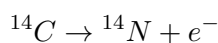
L'émission d'électron ou de positon ne vient pas des couches électroniques, mais est issu de la désintégration d'un neutron en proton qui génère un électron, ou de la désintégration d'un proton en neutron qui génère un positon.



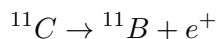
Comme l'émission est systématiquement chargée, elle est déviée en présence d'un champ magnétique.

Un rayonnement β est peu pénétrant une simple feuille d'aluminium suffit pour l'arrêter.

Un exemple de rayonnement β^- est la désintégration du carbone 14 en azote.



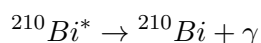
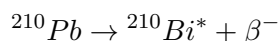
Un exemple de rayonnement β^+ est la désintégration du carbone 11 en bore.



4.3 Rayonnement gamma

Le rayonnement gamma (γ) est un rayonnement qui correspond à l'émission d'un photon comme pour l'ensemble du spectre électromagnétique (cfr. cours sur les ondes). Il est émis lorsque, suite à une désintégration, un noyau dispose d'un surplus d'énergie. On alors qu'il est « excité »⁶. Il réémet alors cette énergie en émettant un photon à haute énergie.

Un exemple de rayonnement γ est l'émission par le Bismuth 210 d'un rayon γ . Le bismuth 210 (^{210}Bi) est lui-même issu de la désintégration du plomb 210 (^{210}Pb).



5 Énergie nucléaire

L'ensemble de ces processus diminue de façon très faible la masse globale de la matière. C'est cette variation de masse qui libère l'énergie nucléaire selon la médiatique formule d'Einstein.

$$E_{\text{nucl.}} = \Delta m \times c^2$$

où :

- $E_{\text{nucl.}}$ est l'énergie libérée ;
- Δm est la variation de masse ;
- c est la vitesse de la lumière ($3.10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$).

Cette énergie respecte donc le premier principe de thermodynamique (conservation de l'énergie).

5. En anglais, positron. Le positon est la première anti-particule découverte.

6. On notera cette excitation par un * sur le symbole

6 Décroissance radioactive

6.1 Demi-vie ou période

La **demi-vie** ou période (T) d'un élément radioactif est la durée nécessaire pour laquelle la moitié des isotopes initialement présents se désintègrent.

Cette demi-vie est une constante pour un isotope donné. Elle dépend :

- ni du nombre initial ;
- ni de l'état physique (gaz, liquide, solide) ;
- ni de la molécule formée par l'isotope ;
- ni de la température.

Isotope	Type de désintégration	Demi-vie
^{238}U	α	$4,5 \cdot 10^9$ ans
^{239}Pu	α	24 000 ans
^{14}C	β^-	5 730 ans
^{26}Ra	α	1 600 ans
^3H	β^-	12,3 ans
^{131}I	β^-	8,07 jours
^{213}Po	α	4 microsecondes

FIGURE 5 – Demi-vies de quelques isotopes.

Prenons comme exemple l'iode 131 (^{131}I), avec un nombre initial d'isotope de $4 \cdot 10^9$. Alors le nombre d'isotopes correspondra au tableau de la figure 6 et au graphique de la figure 7.

Temps	Nombre de demi-vies ($k.T$)	Nombre d'isotopes
0 jours	$0.T$	$4 \cdot 10^9$
8 jours	$1.T$	$2 \cdot 10^9$
16 jours	$2.T$	$1 \cdot 10^9$
24 jours	$3.T$	$500 \cdot 10^6$
32 jours	$4.T$	$250 \cdot 10^6$
40 jours	$5.T$	$125 \cdot 10^6$

FIGURE 6 – Demi-vies de quelques isotopes.

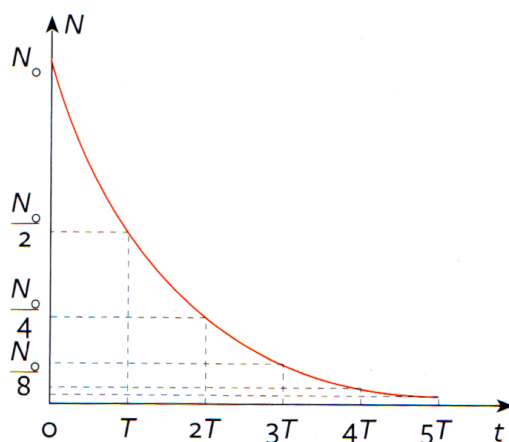


FIGURE 7 – Évolution du nombre de noyaux suivant le temps d'un isotope instable.

On voit assez facilement que pour une valeur entière de k :

$$N = \frac{N_0}{2^k} \quad (1)$$

Le graphique 7 montre que l'évolution du nombre d'isotopes (N) évolue suivant une exponentielle décroissante (négative). On posera donc :

$$N(t) = N_0 \cdot e^{-p \cdot t} \quad (2)$$

où p est la **constante de désintégration**.

Quand $k=1$, après une demi-vie, suivant 1 et 2,

$$\begin{aligned} \frac{N_0}{2^1} &= N_0 \cdot e^{-p \cdot T} \\ \frac{1}{2} &= e^{-p \cdot T} \\ \ln\left(\frac{1}{2}\right) &= \ln(e^{-p \cdot T}) \\ -\ln(2) &= -p \cdot T \end{aligned}$$

donc,

$$p = \frac{\ln(2)}{T} \quad (3)$$

6.2 Activité

L'activité radioactive (« radioactivité ») est définie par le nombre de désintégration par seconde, soit par la variation du nombre d'isotopes au signe près. Elle correspond donc à la dérivée du nombre d'isotopes.

$$A(t) = -(N(t))'$$

selon l'équation 2

$$\begin{aligned} A(t) &= -(N_0 \cdot e^{-p \cdot t})' \\ A(t) &= -N_0 \cdot e^{-p \cdot t} \cdot (-p) \end{aligned}$$

soit :

$$A(t) = p \cdot N_0 \cdot e^{-p \cdot t} \quad (4)$$

toujours selon 2

$$A(t) = p \cdot N(t) \quad (5)$$

donc la relation entre nombre d'isotopes et activité est :

$$N(t) = \frac{A(t)}{p} \quad (6)$$

et donc

$$A(t) = A_0 \cdot e^{-p \cdot t} \quad (7)$$

ou

$$t = \frac{\ln\left(\frac{A(t)}{A_0}\right)}{-p} \quad (8)$$

$$p = \frac{\ln\left(\frac{A(t)}{A_0}\right)}{-t} \quad (9)$$

L'unité SI de l'activité radioactive est le **Becquerel** (Bq) qui correspond à une désintégration par seconde.

7 Les sources de radioactivité

Il existe trois grandes sources de radioactivité :

- la radioactivité naturelle des roches terrestres (et notamment le Radon) ;
- les radiations cosmiques ;
- les radiations artificielles (et notamment les tests médicaux).

La **radioactivité naturelle** est due à l'agrégation de la matière qui a formé initialement la Terre, il y a 4,5 milliards d'années. Ce type de radioactivité est notamment responsable de l'accumulation de radon dans les caves au sud de la Belgique. Elle est responsable de $\pm 50\%$ des doses en Belgique.

Les **radiations cosmiques** sont principalement liés à l'émission par le Soleil de particules ionisantes. Plus, on augmente d'altitude, moins l'atmosphère peut avoir son action de filtre. Un simple vol en avion multiplie par 50 la dose en Sievert par rapport au niveau de la mer. Les habitants de Lhassa (Tibet) ou de La Paz (Bolivie) multiplie par 5 la dose en Sievert par rapport au niveau de la mer. Elles sont responsables de $\pm 10\%$ des doses en Belgique.

Les **radiations artificielles** sont principalement dues aux analyses médicales (Rayons X, ...) . Elles sont responsables de $\pm 40\%$ des doses en Belgique. Les essais nucléaires de 1950 à 1970, les accidents nucléaires civils (Three Miles Island, Tchernobyl, Fukushima, ...) n'ont pas augmenté de façon importante la radioactivité « naturelle » (effet de dilution de la radioactivité).

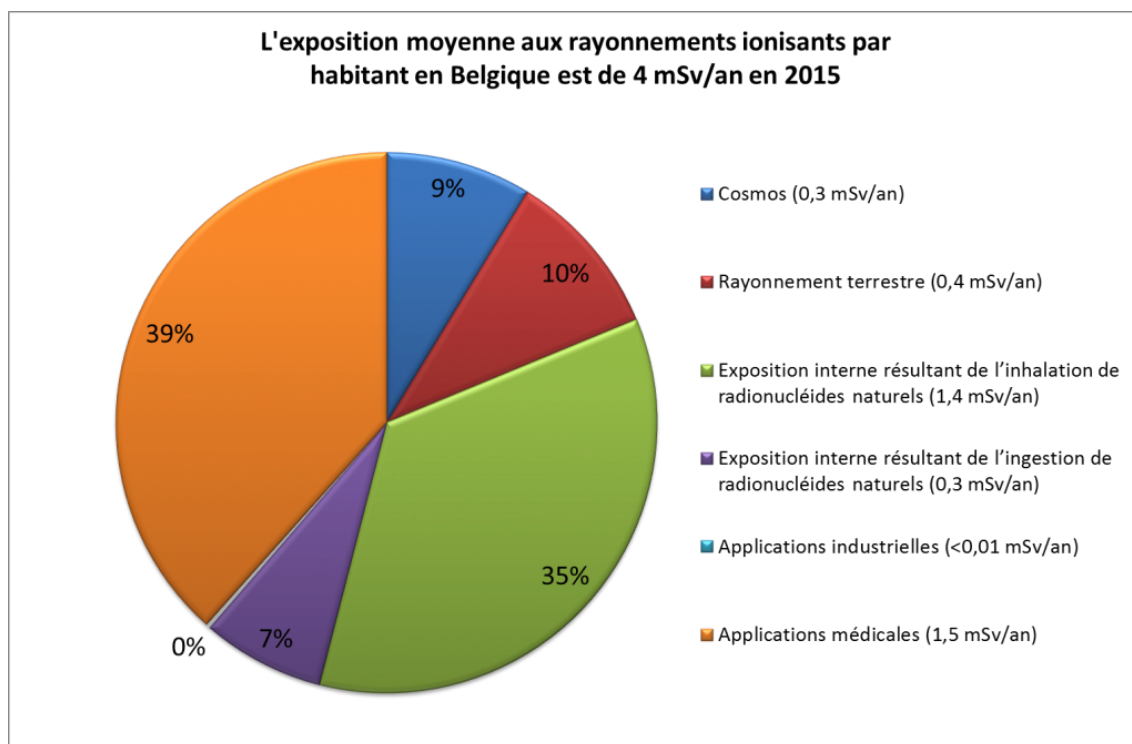


FIGURE 8 – Origine des différentes formes d'exposition aux rayonnements ionisants en Belgique

8 Effets des rayonnements radioactifs

8.1 Unité de mesure

Le **Sievert** (Sv) est l'unité utilisée pour évaluer l'impact de la radioactivité sur le corps humain ⁷. Le Sievert est donc aussi proportionnel au becquerel par unité de masse.

Le Sievert tient donc compte :

- de la quantité d'énergie émise ;
- de la masse du corps humain ;
- du type de rayonnement (α , β , γ) ;
- de l'impact sur la sensibilité des différents organes.

Une dose de 1 Sv correspond à 1.000 radiographies (rayon X). Une dose de 8 Sv en une seule radiation est mortelle.

8.2 Effets sur le corps humain

Il est moins nocif de recevoir de faibles radiations plusieurs fois, que de recevoir une grosse radiation en une fois. Du fait de leur pénétration, les rayons γ sont les plus dangereux.

Les effets sur le corps humains dépendent :

- de la dose de radioactivité ;
- de la durée et de la répétition (effet cumulatif) de l'exposition ;
- des organes atteints (cécité s'il rentre par le cristallin, par exemple).

Outre les effets immédiats, il existe aussi des effets à long terme due à l'effet mutagène des rayonnements ionisants :

- cancers et tumeurs, tels que leucémie, ... ;
- anomalies des cellules reproductrices (ovocyte, spermatozoïde) entraînant la stérilité ou des problèmes congénitaux.

Dose (Sv)	Effets
0 à 0,25	aucun effet apparent à court terme
1 à 2,5	troubles digestifs, épilations partielles, fatigue, troubles sanguins légers
2,5 à 4	nausées, vomissements, modification sanguine, risques mortels élevés
au-delà	au moins 90 % de mortalité

FIGURE 9 – Effets d'une irradiation brutale sur le corps entier.

De ce fait, des normes d'exposition (reprise au tableau de la figure 10) ont été édictées prenant en compte l'accumulation de rayonnement.

Au niveau professionnel, toutes personnes exposées à des rayonnements ionisants (personnel, médical, personnel d'un réacteur nucléaire, ...) doit porter en permanence un ou plusieurs dosimètres à des positions particulières de leur corps. Ce dosimètre mesure le cumul de radiations auxquels est soumis le travailleur.

⁷. Il est dérivé du Gray (Gy) qui est une mesure plus généraliste sur tout être vivant. Le Gray mesure une quantité d'énergie radioactive par masse de matière vivante.

<i>Limites de doses</i>	<i>Public</i>	<i>Personnes professionnellement exposées (*)</i>	<i>Apprentis & étudiants (16 -18 ans)</i>
<i>Dose efficace (E)</i>	1 mSv par an, 1 mSv durant la grossesse	20 mSv par 12 mois consécutifs glissants	6 mSv par an
<i>Dose équivalente (H)</i> Cristallin	15 mSv par an	20 mSv par 12 mois consécutifs glissants	15 mSv par an
Peau (moyenne sur une surface d'1 cm ²)	50 mSv par an	500 mSv par 12 mois consécutifs glissants	150 mSv par an
Mains, avant-bras, pieds et chevilles	Pas d'application	500 mSv par 12 mois consécutifs glissants	150 mSv par an

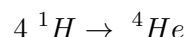
FIGURE 10 – Relation entre doses radioactives et impact sur le corps humain

9 Fusion nucléaire

La fusion nucléaire est le processus qui permet de produire des isotopes de plus en plus lourds en fusionnant des isotopes moins lourds.

Jusque l'isotope de fer (Fe), le bilan énergétique de ce type de réaction est positif. L'énergie libérée est plus importante que l'énergie absorbée pour la formation des nouveaux isotopes.

C'est ce processus qui se produit au sein des étoiles, où principalement la fusion de l'hydrogène (H) produit de l'hélium (He).



L'être humain a pu produire des systèmes libérant ce type d'énergie. Il s'agit des bombes H ou bombes thermonucléaires. Cependant, à l'heure actuelle, il est incapable de les réguler pour produire des centrales nucléaires de ce type vu les quantités phénoménales de l'énergie libérée.

10 Fission nucléaire

La fission nucléaire est le processus qui permet de produire des isotopes moins lourds en désintégrant des isotopes plus lourds.

Ce type de technologie est utilisée dans des bombes nucléaires et des réacteurs civils.

Les isotopes utilisés sont l'uranium, le plutonium et le thorium.

11 Réacteur REP

11.1 Fonctionnement

Le type de réacteur civil qui compose 2/3 du parc nucléaire mondial est le réacteur à fission nucléaire à eau pressurisée (REP, Réacteur à Eau Pressurisée, *PWR pour pressurized water reactor* en anglais).

Ce type de réacteur utilise des isotopes d'uranium 235 (^{235}U) afin de produire une réaction de fission nucléaire.

La réaction car chaque uranium 235 libère 3 neutrons. Si la densité de l'uranium 235 est suffisante (uranium enrichi), la probabilité est suffisante pour que au moins un neutron aille percuter un autre isotope d'uranium 235 ce qui perpétuera la réaction.

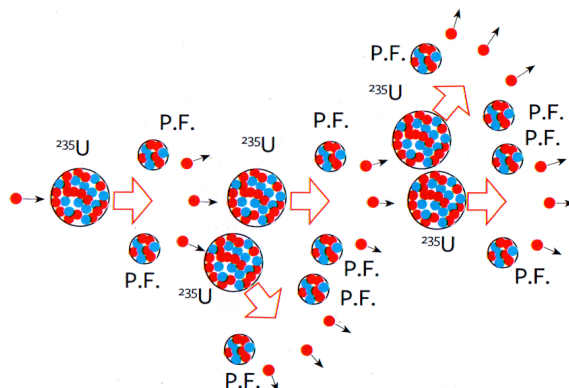


FIGURE 11 – Chaîne de réaction de la désintégration de l'uranium (P.F. = Produit fissile)

La disponibilité d'uranium est estimée actuellement à +/- 100 ans.

Ce type produit des isotopes lourds utilisables pour la production de bombes nucléaires.

Ce type de réacteur est séparé en 5 processus :

1. La réaction nucléaire se déroule dans une enceinte confinée en béton armé.
 - Cette réaction chauffe de l'eau à haute température (300 °C) et à haute pression (150 bars, pour que l'eau reste liquide) dans un circuit primaire.
 - Des barres de contrôle régulent la réaction (en absorbant ou non la radioactivité). En cas d'incident, ces barres tombent simplement par gravité pour stopper la réaction nucléaire.
2. Un échangeur thermique transfère la chaleur dans un circuit secondaire constitué d'eau qui se convertit en vapeur. Cet échangeur permet de
 - confiner la radioactivité sur le circuit primaire ;
 - de diminuer la température et la pression du système.
3. La vapeur entraîne une turbine.
4. La turbine entraîne un alternateur à haute-tension.
5. Un condenseur refroidit la vapeur d'eau pour qu'elle redevienne liquide
 - Ce condenseur demande donc une source d'eau froide permanente, généralement une rivière, un fleuve ou la mer.
 - L'ensemble des circuits primaire et secondaire circule grâce des pompes qui en toute circonstance doivent rester alimentées.

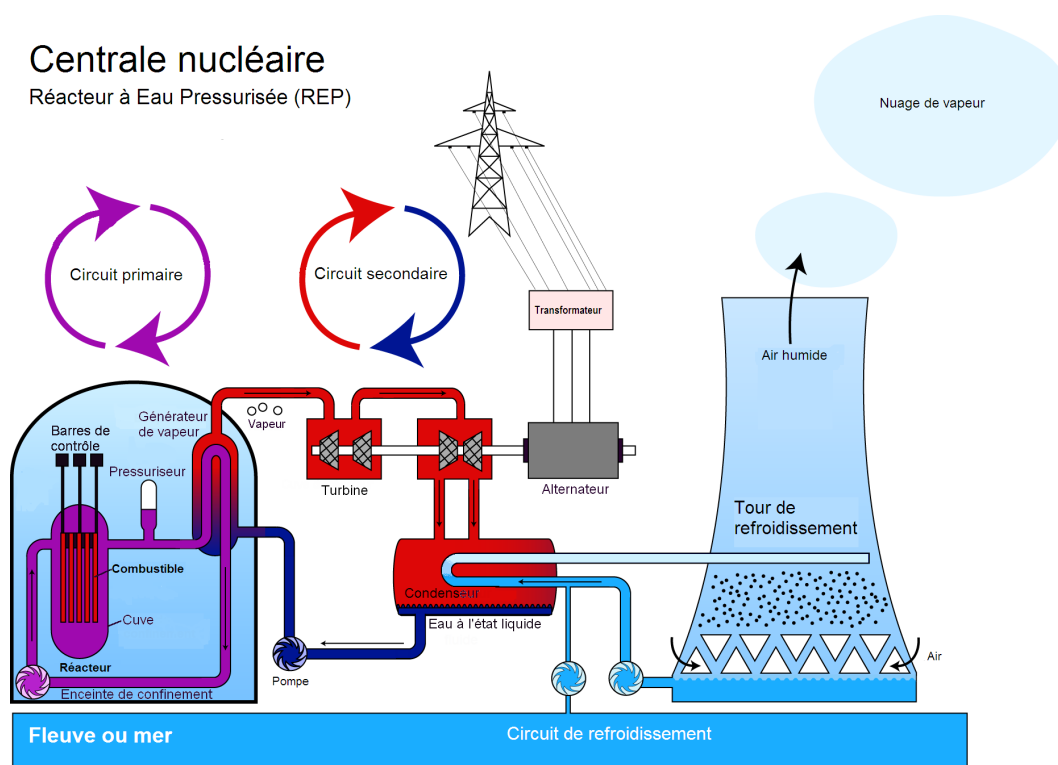


FIGURE 12 – Fonctionnement d'une centrale nucléaire

11.2 Déchets radioactifs

L'Organisme national des déchets radioactifs et des matières fissiles enrichies (ONDRAF) est l'organisme belge chargé de la gestion des déchets radioactifs.

En Belgique, les déchets sont classés en trois catégories :

- la catégorie A : déchets à faible activité (< 2 mSv/h) ou courte durée de vie (< 30 ans)
- la catégorie B : de déchets d'activité moyenne (2 mSv/h à 2000 mSv/h)
- la catégorie C : de déchets de haute et très haute activité (> 2000 mSv/h)

	Faible activité (< 5 mSv/h)	Moyenne activité	Haute activité (> 2000 mSv/h)
Courte durée de vie (< 30 ans)	A	A	C
Longue durée de vie (> 30 ans)	B	B	C

FIGURE 13 – Classes de déchets en Belgique

Les déchets de haute activité représentent un faible volume (1,4 % de tous les déchets) mais ceux-ci contiennent la large majorité des radionucléides (98% de la radioactivité totale). Ils sont en majorité composés de déchets issus des centrales nucléaires belges vitrifiés après retraitement à l'usine de La Hague (France).

Le graphique de la figure 14 montre l'évolution de différents déchets d'une centrale nucléaire. On peut remarquer que la radiotoxicité totale sera divisée par moins de 10 après 1000 ans. Il faudra plus de 100 000 ans pour que la radiotoxicité totale revienne à celle du minerai d'uranium (« uranium ore »).

Pour les déchets de faible activité, l'ONDRAF a étudié, avec des partenariats locaux, des projets de stockage en surface ou en couche géologique (Mol, Dessel, Fleurus). Le gouvernement fédéral a décidé le 23 juin 2006 de retenir la candidature de la commune de Dessel. L'ONDRAF dépose une demande d'autorisation auprès de l'Agence fédérale de contrôle nucléaire (AFCN) en 2013. Les travaux de construction devraient débuter en 2024.

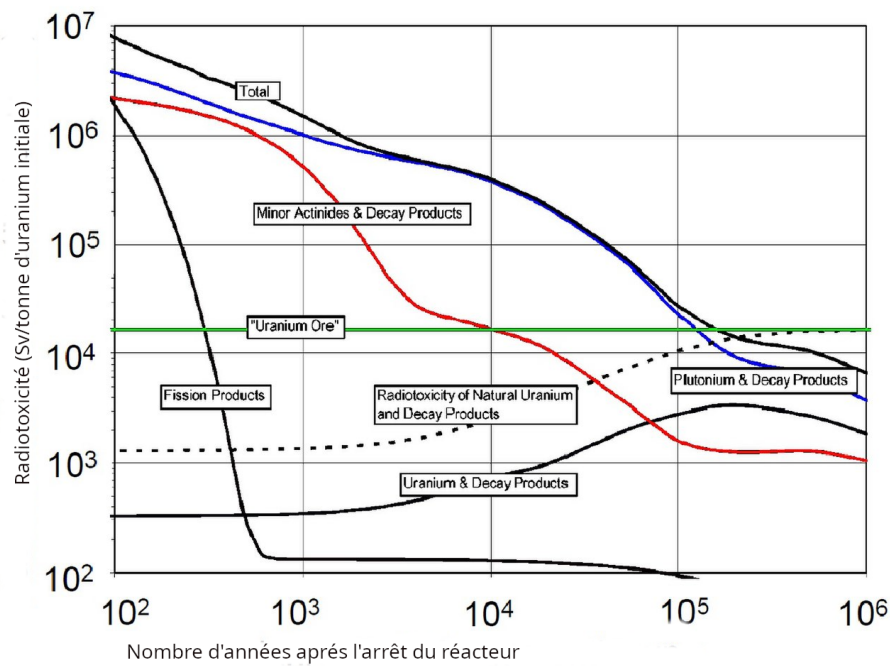


FIGURE 14 – Évolution de la radiotoxicité des déchets radioactifs d'une centrale nucléaire.

Pour les déchets radioactifs de catégorie B et de catégorie C, la solution du stockage géologique dans une installation souterraine est préconisée par l'ONDRAF et a été retenue officiellement en novembre 2022 par le gouvernement fédéral. Aucun lieu n'a actuellement été décidé pour ce type de stockage.

L'ONDRAF prévoit le stockage en profondeur à partir de 2070 pour les déchets de catégorie B et 2110 pour ceux de catégorie C. En attendant, ils devront être entreposés.

Table des matières

1	Isotopes	1
1.1	Proton	2
1.2	Électron et positon	2
1.3	Neutron	2
2	Interactions au sein d'un atome	2
2.1	Interactions électriques et magnétiques	2
2.2	Interaction nucléaire forte	3
3	Stabilité du noyau	4
4	Rayonnement lié à une désintégration	4
4.1	Rayonnement alpha	4
4.2	Rayonnement bêta	5
4.3	Rayonnement gamma	5
5	Énergie nucléaire	5
6	Décroissance radioactive	6
6.1	Demi-vie ou période	6
6.2	Activité	7
7	Les sources de radioactivité	8
8	Effets des rayonnements radioactifs	9
8.1	Unité de mesure	9
8.2	Effets sur le corps humain	9
9	Fusion nucléaire	10
10	Fission nucléaire	10
11	Réacteur REP	11
11.1	Fonctionnement	11
11.2	Déchets radioactifs	12