

## ♣ Comment fonctionne (ou pas) une centrale nucléaire ? ♣

L'ouvrage "La supplication" de Svetlana Alexievitch figure au programme de français de cette année. À ce titre, il peut être utile de rappeler quelques notions de physique nucléaire ainsi que de décrire sommairement le fonctionnement d'une centrale.

### 1 Noyau atomique

#### 1.1 Description

La plus petite entité caractéristique d'un élément chimique est l'atome (du grec ancien *atomos*, «insécable»).

Un atome est constitué d'un **noyau** entouré d'**électrons** formant un "nuage électronique".

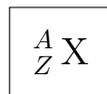
Le noyau est lui même constitué de **nucléons** reliés par l'interaction forte :

- des **protons** de charge positive  $+e$
- des **neutrons** de charge nulle

Chaque électron porte une charge négative  $-e$ .

La charge élémentaire  $e$  fait partie désormais des constantes fondamentales fixées en unité SI :  
 $e = 1,602\,176\,634 \cdot 10^{-19}$  C. On retient  $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  C.

On représente l'atome d'un élément X par :



- **Z numéro atomique** ou **nombre de charge** = nombre de protons du noyau. C'est lui qui caractérise l'élément chimique X.
- **A nombre de masse** = nombre de nucléons (protons+neutrons) du noyau

Un atome étant neutre, il possède un nombre d'électrons égal au nombre de protons.

Exemples :

${}^{238}_{92}\text{U}$  et  ${}^{235}_{92}\text{U}$  constituent différents **isotopes** de l'uranium. Ils possèdent le même nombre de protons mais des nombres de neutrons différents.

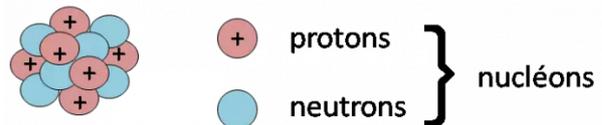
${}^{12}_6\text{C}$ ,  ${}^{13}_6\text{C}$  et  ${}^{14}_6\text{C}$  sont quant à eux des **isotopes** du carbone.

La taille d'un atome est de l'ordre de  $10^{-10}$  m soit  $1 \text{ \AA}$  (angström).

La taille du noyau est de l'ordre du femtomètre ( $10^{-15}$  m).

#### 1.2 Énergie de liaison

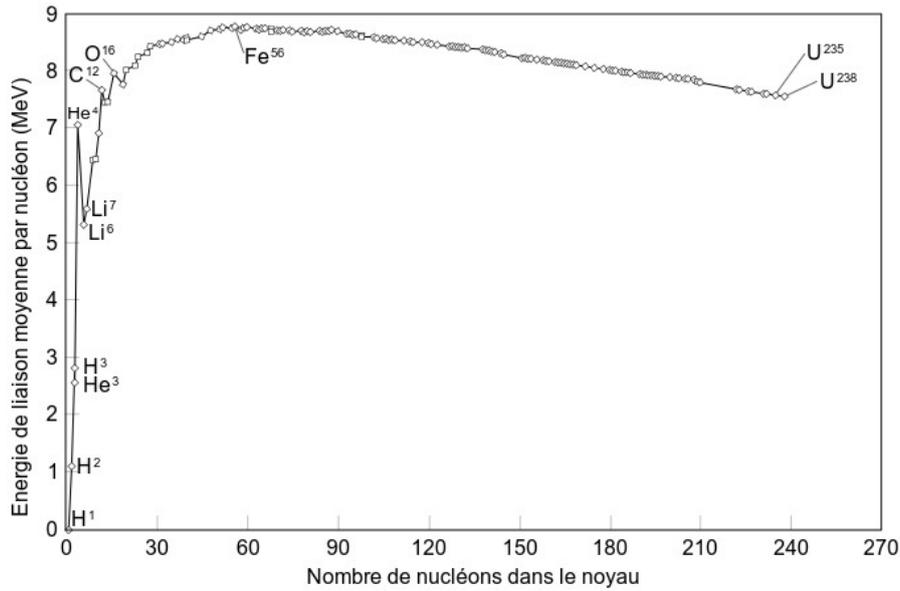
À l'intérieur du noyau, les protons de charge positive, se repoussent via l'**interaction électromagnétique**. La cohésion du noyau est alors assurée par l'**interaction forte**. C'est une interaction attractive, de très grande intensité et de très courte portée ( $10^{-15}$  m) qui s'exerce entre deux nucléons.



**Énergie de liaison :**

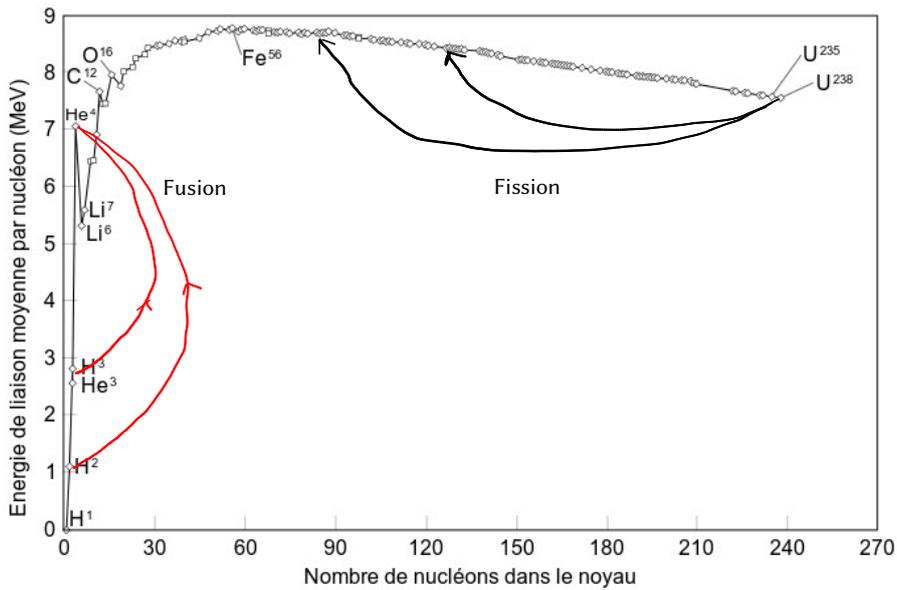
L'**énergie de liaison**  $E$  d'un noyau atomique est l'énergie qu'il faut fournir au noyau pour le dissocier en ses nucléons. Inversement, c'est l'énergie libérée lors de la constitution du noyau à partir de ses nucléons pris séparément.

On définit aussi l'**énergie de liaison par nucléon**,  $E/A$ , où  $A$  désigne le nombre de masse du nucléide).



Courbe d'Aston : énergie de liaison par nucléon ( $E/A$ ) en fonction du nombre de nucléons ( $A$ ) pour les isotopes les plus courants.

source Wikipedia : [https://fr.wikipedia.org/wiki/Liaison\\_nucléaire](https://fr.wikipedia.org/wiki/Liaison_nucléaire)



On constate graphiquement que la **fission** d'un élément lourd en deux éléments plus légers libère de l'énergie puisque l'énergie nécessaire pour casser le noyau lourd est inférieure à l'énergie libérée lors de la reconstitution des deux noyaux plus légers.

Inversement c'est la **fusion** d'éléments très légers qui libère de l'énergie : l'énergie dépensée pour casser les deux noyaux légers est inférieure à l'énergie libérée lorsque de la constitution du noyau par fusion.

C'est la réaction de **fission** qui est mise en œuvre dans les centrales nucléaires.

La réaction de **fusion** contrôlée en est encore au stade expérimental, notamment avec le projet ITER.

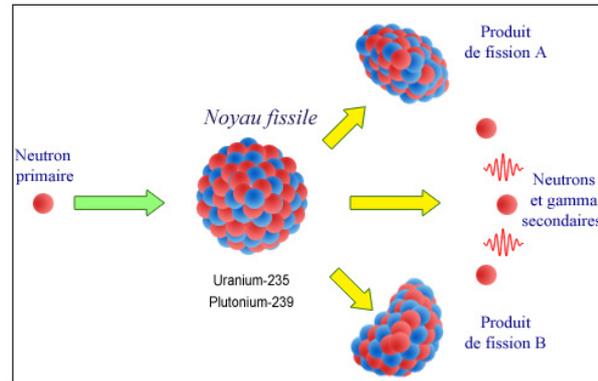
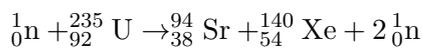
## 2 La fission de l'uranium

### 2.1 Généralités

Le phénomène de fission nucléaire de l'uranium a été découvert par Otto Hahn et Fritz Strassmann et interprété par Lise Meitner et Otto Frisch en 1938, soit bien après la découverte de la radioactivité dite "naturelle" sur laquelle nous reviendrons au paragraphe 5.

Un gros noyau d'uranium 235 ( $^{235}_{92}\text{U}$ ) est dit **fissile** : la capture d'un neutron forme un noyau très instable qui se scinde alors en deux noyaux plus légers. Cette fission s'accompagne de l'émission de 2 à 3 neutrons (suivant les produits de fission) et éventuellement d'un photon  $\gamma$ .

Exemple de réactions de fission possibles :



Ainsi, une réaction en chaîne est possible : les neutrons produits peuvent à leur tour être absorbés par d'autres noyaux d'uranium 235, qui fissionneront en produisant de nouveaux neutrons etc...

Cette réaction en chaîne non maîtrisée a conduit à la fabrication de la bombe atomique. Dans un réacteur nucléaire cette réaction en chaîne doit être contrôlée : pour éviter l'emballement de la réaction il ne doit pas y avoir plus de neutrons produits que de neutrons absorbés.

Autre élément fissile : le plutonium 239, qui n'existe pas à l'état naturel.

### 2.2 Défaut de masse : bilan d'énergie d'une réaction de fission de l'uranium

Grâce à la célèbre formule d'Einstein  $E = mc^2$ , on peut raisonner sur la masse plutôt que sur l'énergie.

Si de l'énergie est libérée au cours d'une réaction nucléaire, c'est qu'une partie de la masse initiale a été convertie en énergie. Ainsi, la masse des produits finaux est inférieure à la masse des produits initiaux.

#### Bilan énergétique d'une réaction de fission

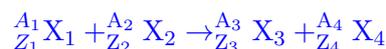
On considère une des réactions de fission possible pour le noyau d'uranium 235 :



La réaction nucléaire précédente doit vérifier deux lois de conservation :

- la conservation du nombre de nucléons  $A$
- la conservation du nombre de charge  $Z$

Ainsi, pour une réaction nucléaire quelconque d'équation :



on aura : 
$$\begin{cases} A_1 + A_2 = A_3 + A_4 \\ Z_1 + Z_2 = Z_3 + Z_4 \end{cases}$$

On se propose de calculer l'énergie libérée par la fission d'un noyau, puis par 1 g d'uranium 235.

Données :

- On donne, dans le tableau ci-contre, les masses des noyaux exprimées en **unité de masse atomique** notée  $u$  :

$$u = 1,66054 \cdot 10^{-27} \text{ kg} = 931,49 \text{ MeV}/c^2$$

avec  $c = 3,00 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1}$ .

- Masse atomique de l'uranium 235 :  $235,04 \text{ g.mol}^{-1}$ .

Par définition la masse atomique de l'uranium 235 correspond à la masse d'une mole d'atome d'uranium 235 ( soit  $\mathcal{N}_a = 6,02 \cdot 10^{23}$  atomes d'uranium 235 ).

Noyau	Masse ( $u$ )
${}_{92}^{235}\text{U}$	234,9935
${}_{38}^{94}\text{Sr}$	93,8945
${}_{54}^{140}\text{Xe}$	139,8920
${}_0^1\text{n}$	1,0087

Faisons le bilan de masse :

$$\text{Masse initiale : } m_i = (234,9935 + 1,0087)u = 236,0022u$$

$$\text{Masse finale : } m_f = (93,8945 + 139,8920 + 2 \times 1,0087)u = 235,8039u$$

$\Delta m = m_f - m_i < 0$  : la masse finale est inférieure à la masse initiale. Cette diminution de masse se traduit par une libération d'énergie :

On en déduit  $E_\ell$  l'énergie libérée par la fission d'un noyau :

$$E_\ell = |\Delta m|c^2 = (236,0022 - 235,8039) \times 1,66054 \cdot 10^{-27} \times (3,00 \cdot 10^8)^2 = 2,96 \cdot 10^{-11} \text{ J}$$

Puis l'énergie libérée par 1 g d'uranium 235 :

$$\frac{1}{235,04} \times 6,02 \cdot 10^{23} \times E_\ell = 7,59 \cdot 10^{10} \text{ J}$$

D'après Wikipedia, la consommation moyenne d'électricité pour l'éclairage et l'électroménager pour une personne est de 1100 kWh/an.

Commenter le résultat obtenu précédemment.

On convertit l'énergie moyenne consommée par an en J/an :

$$1100 \cdot 10^3 \times 3600 = 3,96 \cdot 10^9 \text{ J/an}$$

La valeur de l'énergie produite par 1 g d'uranium 235 correspond à la consommation annuelle d'électricité d'environ 20 personnes. Cependant toute l'énergie produite au niveau du réacteur n'est pas transformée en énergie électrique. Nous étudierons dans le cours de thermodynamique le rendement d'une centrale.

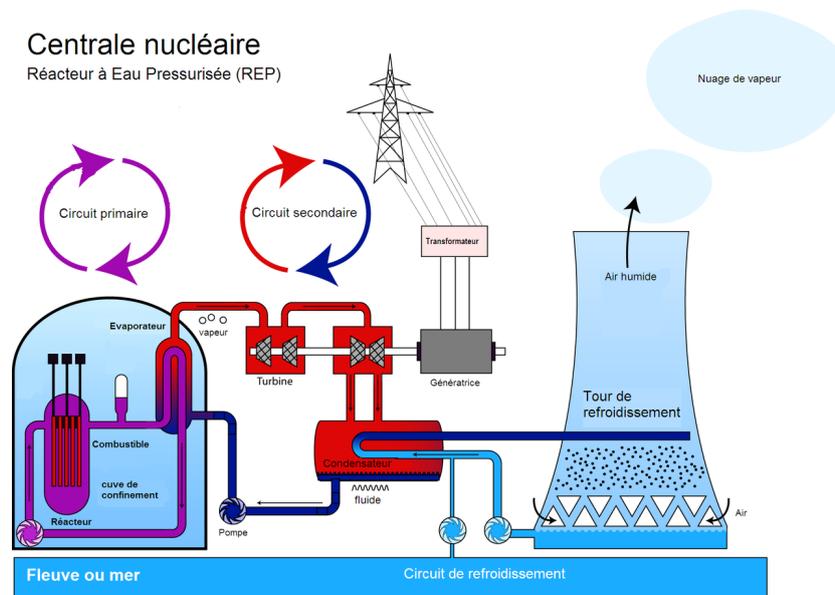
## 3 Principe de fonctionnement d'une centrale

### 3.1 Description générale

Le principe d'une centrale électrique, qu'elle soit nucléaire, au gaz ou au charbon est, en général, toujours le même.

Il faut une grande "marmite" pour chauffer de l'eau puis la vaporiser. La vapeur produite sert à faire tourner une turbine qui entraîne un alternateur qui produit de l'électricité (comme une dynamo produit de l'électricité lorsqu'elle est entraînée par une roue de vélo).

La vapeur d'eau est ensuite condensée (*i.e.* transformée en liquide) avant d'être renvoyée à la "marmite" afin de recommencer un nouveau cycle. Pour refroidir puis condenser la vapeur, les centrales électriques utilisent l'eau d'un fleuve ou l'eau de mer.



Dans le cas d'une centrale nucléaire, la "marmite" correspond au réacteur

### 3.2 Réacteur nucléaire

Un réacteur nucléaire permet de réaliser une réaction de fission en chaîne et d'en contrôler l'intensité. Il comporte quatre éléments principaux :

- le **combustible**

À l'état naturel l'uranium contient 99,2743% d'uranium 238, 0,72% d'uranium 235 (ce qui est très peu!), et des traces d'uranium 234. Le combustible est en général de l'uranium enrichi en uranium 235 (à un taux de 5% environ). Il est présent à l'intérieur du réacteur sous forme de longues barres cylindriques appelées "crayons".

- le **fluide caloporteur**, en général de l'eau, qui transporte la chaleur hors du cœur du réacteur.
- le **modérateur** qui permet de ralentir les neutrons produits.

Les neutrons produits lors de la réaction de fission sont très rapides (20 000 km/s). Or, ils sont d'autant mieux absorbés par un noyau de  $^{235}\text{U}$  qu'ils sont plus lents. On ralentit donc les neutrons rapides produits jusqu'à une vitesse de l'ordre de 2 km/s. Pour cela certaines centrales utilisent soit de l'eau  $\text{H}_2\text{O}$ , soit de l'eau lourde  $\text{D}_2\text{O}$ , où D correspond à un isotope de l'hydrogène  $^2_1\text{H}$  appelé deutérium dont le noyau comporte un proton et un neutron. D'autres centrales, comme celle de Tchernobyl, utilisent du graphite. C'est d'ailleurs ce graphite qui s'est enflammé au contact de l'oxygène de l'air lorsque le couvercle de la "marmite" a sauté.

[https://www.laradioactivite.com/site/pages/Moderateurs\\_Neutrons.htm](https://www.laradioactivite.com/site/pages/Moderateurs_Neutrons.htm)

- le **contrôleur de la réaction**

Pour éviter l'emballement du réacteur ou simplement diminuer sa puissance, il faut pouvoir absorber les neutrons produits. Pour cela, les centrales utilisent en général des **barres de contrôle** qui peuvent être plus ou moins enfoncées dans le réacteur. On utilise par exemple des alliages argent-indium-cobalt. La centrale de Tchernobyl utilisait des barres de contrôle en bore. Visiblement ces barres ont également posé problème lors de l'incident de Tchernobyl.

Pour démarrer la réaction en chaîne dans un réacteur, une source de neutrons est nécessaire. Cette source peut être par exemple du californium, ou une association d'américium avec du béryllium ou du polonium.

Principe de fonctionnement des différents types de réacteur :

<https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/principes-de-fonctionnement-d-un-reacteur-nucleaire>

<http://www.cea.fr/comprendre/Pages/energies/nucleaire/essentiel-sur-fonctionnement-reacteur-nucleaire-electrogene.aspx>

## 4 Description de l'accident de la centrale de Tchernobyl

Le réacteur de Tchernobyl, qui a explosé le 26 avril 1986, est un réacteur RBMK de 1000 MW de conception soviétique. Le modérateur utilisé est du graphite. Aujourd'hui, il reste encore 11 réacteurs de ce type en fonctionnement en Russie. Ils ont subi des améliorations qui corrigent en partie les défauts constatés à Tchernobyl.

*L'accident s'est produit à l'occasion d'un arrêt du réacteur en dehors de son fonctionnement normal. Il avait été décidé de profiter d'un arrêt de maintenance planifié pour procéder à un test de l'alimentation électrique de secours (...). L'expérience avait pour objet de déterminer si le refroidissement du cœur pouvait être assuré en cas de perte de l'alimentation électrique.*

*En effet, après l'arrêt des réactions de fission, il faut continuer de refroidir le cœur du fait de l'important dégagement de chaleur des désintégrations radioactives. En cas de panne, l'inertie des volants de la turbine fournirait-elle encore assez d'énergie électrique aux pompes de circulation de l'eau de refroidissement en attendant le démarrage des groupes diesel de secours ? Des tests similaires avaient été réalisés en 1982, 1984 et 1985 mais les résultats n'avaient pas été concluants.*

[https://www.laradioactivite.com/site/pages/Essai\\_Malencontreux.htm](https://www.laradioactivite.com/site/pages/Essai_Malencontreux.htm)

Beaucoup de facteurs ont contribué à une marche inéluctable vers l'accident : l'essai a été retardé de 12 h au dernier moment. C'est donc l'équipe de nuit, soit une autre équipe que celle initialement prévue, qui doit procéder à l'essai dans un délai plus court.

La baisse de puissance est alors réalisée trop rapidement. Le xénon s'accumule dans le réacteur et l'"étouffe". Au lieu d'arrêter totalement le réacteur pendant 24h, le temps de laisser le xénon disparaître, la puissance est de nouveau augmentée grâce au retrait des barres de contrôle. Des systèmes de sécurité sont désactivés. Or, le réacteur se trouve dans un domaine de puissance où son fonctionnement est instable. Le coup de grâce est donné lors de l'arrêt de l'alimentation en vapeur de la turbine : la température dans le réacteur augmente, le réacteur s'emballe (problème du coefficient positif de température). Pour éviter cet emballement, les barres de contrôle sont redescendues, mais trop lentement. La pression dans le réacteur devient tellement élevée que le socle de 20 000 tonnes en béton est soulevé laissant s'échapper une grande quantité d'éléments radioactifs dans l'atmosphère. Le graphite s'enflamme au contact de l'oxygène de l'air, provoquant un incendie qui sera très difficile à maîtriser.

autres liens utiles :

<https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/tchernobyl>

<https://www.laradioactivite.com/site/pages/Tchernobyl.htm>

[https://www.irsn.fr/FR/connaissances/Installations\\_nucleaires/Les-accidents-nucleaires/accident-tchernobyl-1986/2016-Tchernobyl-30ans-apres/Pages/1-Tchernobyl-2016-30ans-apres-accident.aspx#.XzT2RhngRY](https://www.irsn.fr/FR/connaissances/Installations_nucleaires/Les-accidents-nucleaires/accident-tchernobyl-1986/2016-Tchernobyl-30ans-apres/Pages/1-Tchernobyl-2016-30ans-apres-accident.aspx#.XzT2RhngRY)

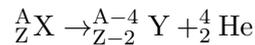
## 5 Radioactivité naturelle des produits de la fission

Les produits issus de la fission nucléaire sont en général *naturellement* radioactifs : ils se désintègrent sans intervention d'un neutron extérieur. La radioactivité *naturelle* (ou spontanée) a été découverte par Becquerel en 1896, puis étudiée par de nombreux chercheurs dont Pierre et Marie Curie, Ernst Rutherford... Il est temps d'en dire quelques mots.

### 5.1 Les trois types de radioactivité

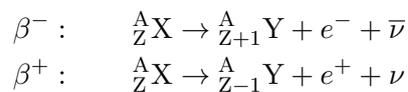
#### ♣ La radioactivité $\alpha$ .

La désintégration s'accompagne de l'émission d'une **particule  $\alpha$**  (c'est-à-dire d'un noyau d'hélium) :



#### ♣ La radioactivité $\beta$ .

La désintégration s'accompagne de l'émission d'un électron (radioactivité  $\beta^-$ ) ou d'un positron (radioactivité  $\beta^+$ ) :

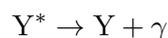


*Remarques :*

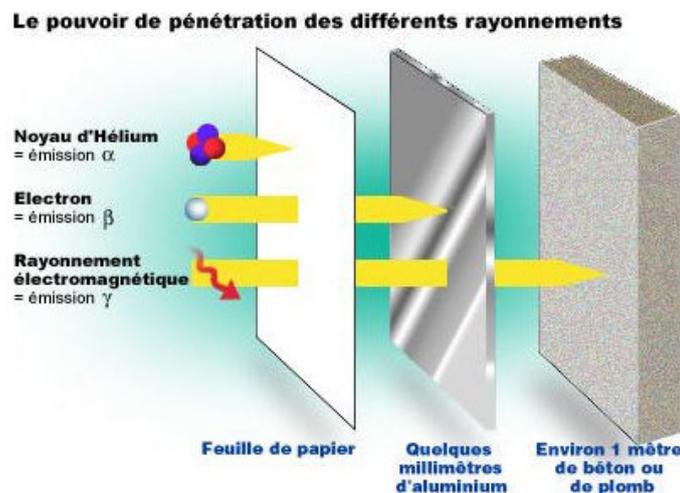
- Au cours d'une émission  $\beta^-$  un neutron du noyau se transforme en proton et un électron est émis (la charge totale est ainsi conservée). La dernière particule émise est un antineutrino  $\bar{\nu}$ . Le neutrino a été introduit par Fermi en 1932 pour assurer la conservation de l'énergie. Il n'a été détecté que beaucoup plus tard en 1956.
- Au cours d'une émission  $\beta^+$ , c'est un proton du noyau qui se transforme en neutron. L'émission du positron  $e^+$  permet la conservation de la charge. La dernière particule émise est un neutrino  $\nu$ .
- La radioactivité  $\beta$  fait intervenir une autre interaction que l'interaction électromagnétique ou l'interaction forte : c'est l'**interaction faible**.
- Le positron  $e^+$  est l'antiparticule associée à l'électron  $e^-$ .

#### ♣ La radioactivité $\gamma$ .

En général les noyaux Y issus de la désintégration sont dans un état excité. Ils se désexcitent en émettant un photon très énergétique (photon  $\gamma$ )



Tous les rayonnements émis ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ) n'ont pas le même pouvoir de pénétration.



Les neutrons émis lors du processus de fission ont un grand pouvoir de pénétration. Ils sont arrêtés par une forte épaisseur de béton, d'eau ou de paraffine.



Radionucléide	Période radioactive
Iode 131	8,02 jours
Tellure 132	78 heures
Baryum 140	12,8 jours
Césium 134	2,2 ans
Césium 137	30,2 ans
Strontium 90	28,8 ans
Uranium 235	0,7 milliards d'années
Uranium 238	4,5 milliards d'années

Compte tenu des valeurs des périodes radioactives indiquées, quels sont les éléments rejetés dans l'atmosphère lors de l'accident de 1986 susceptibles de poser encore problème aujourd'hui ?

Dans le livre "La supplication", quelle est la méthode évoquée pour se protéger des dangers liés à l'iode radioactif ?

## 5.5 Gestion des déchets

Les déchets de haute activité à vie longue (HA-VL) correspondent aux déchets issus du traitement des combustibles nucléaires usés : ils contiennent les produits de fission et les actinides mineurs formés par les réactions nucléaires dans le combustible lors de son séjour en réacteur. Leur durée de vie peut s'étendre sur plusieurs milliers, voire plusieurs millions d'années. Ils ne représentent que 0,2% du volume des déchets radioactifs mais 96% de la radioactivité totale des déchets radioactifs en France.

– Une piste d'avenir serait la mise au point des nouveaux réacteurs de quatrième génération, dit "à neutrons rapides" (donc sans modérateur). Ils présenteraient l'avantage d'utiliser le plutonium produit dans les centrales de génération antérieure, ainsi que tout type d'uranium (et pas seulement l'uranium-235 qui est un composant minoritaire de l'uranium naturel). Enfin, ces réacteurs permettraient de réaliser une transmutation qui transformerait certains produits de fission en éléments de période plus courte. Bref, ils permettraient d'extraire encore de l'énergie des déchets actuels tout en les rendant moins radiotoxique à long terme.

– Une autre piste déjà envisagée consiste en l'enfouissement des déchets dans des couches géologiques profondes (voir le projet CIGEO de l'ANDRA)

Pour plus d'information :

<http://www.cea.fr/comprendre/Pages/radioactivite/essentiel-sur-dechets-radioactifs.aspx>

[https://www.laradioactivite.com/site/pages/Stockage\\_Geologique.htm](https://www.laradioactivite.com/site/pages/Stockage_Geologique.htm)

## 6 Les unités

Il existe une grande disparité dans les unités utilisées pour mesurer l'exposition à la radioactivité.

♣ **Le becquerel (Bq)** : cette unité mesure l'*activité* d'une source en comptant *le nombre de désintégration par unité de temps*.

**1 Bq correspond à 1 désintégration par seconde**

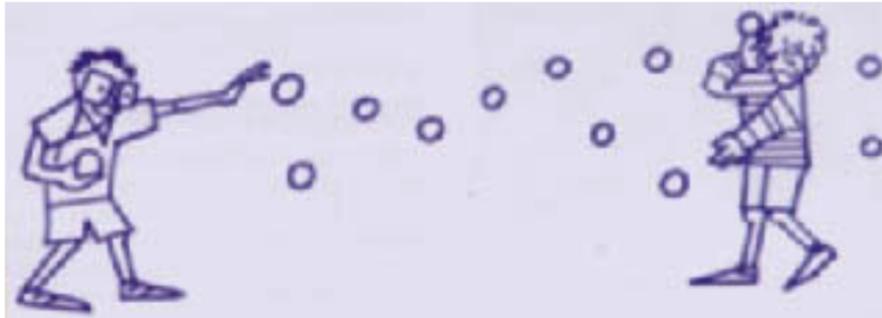
Exemples :

- radioactivité naturelle moyenne du corps humain adulte : 8000 Bq
- radioactivité naturelle de l'eau de mer : 10 Bq/L
- radioactivité naturelle d'un sol granitique : 8 000 Bq/kg

♣ **Le gray (Gy) :** Cette unité caractérise la dose d'énergie reçue par unité de volume pour un organisme donné.

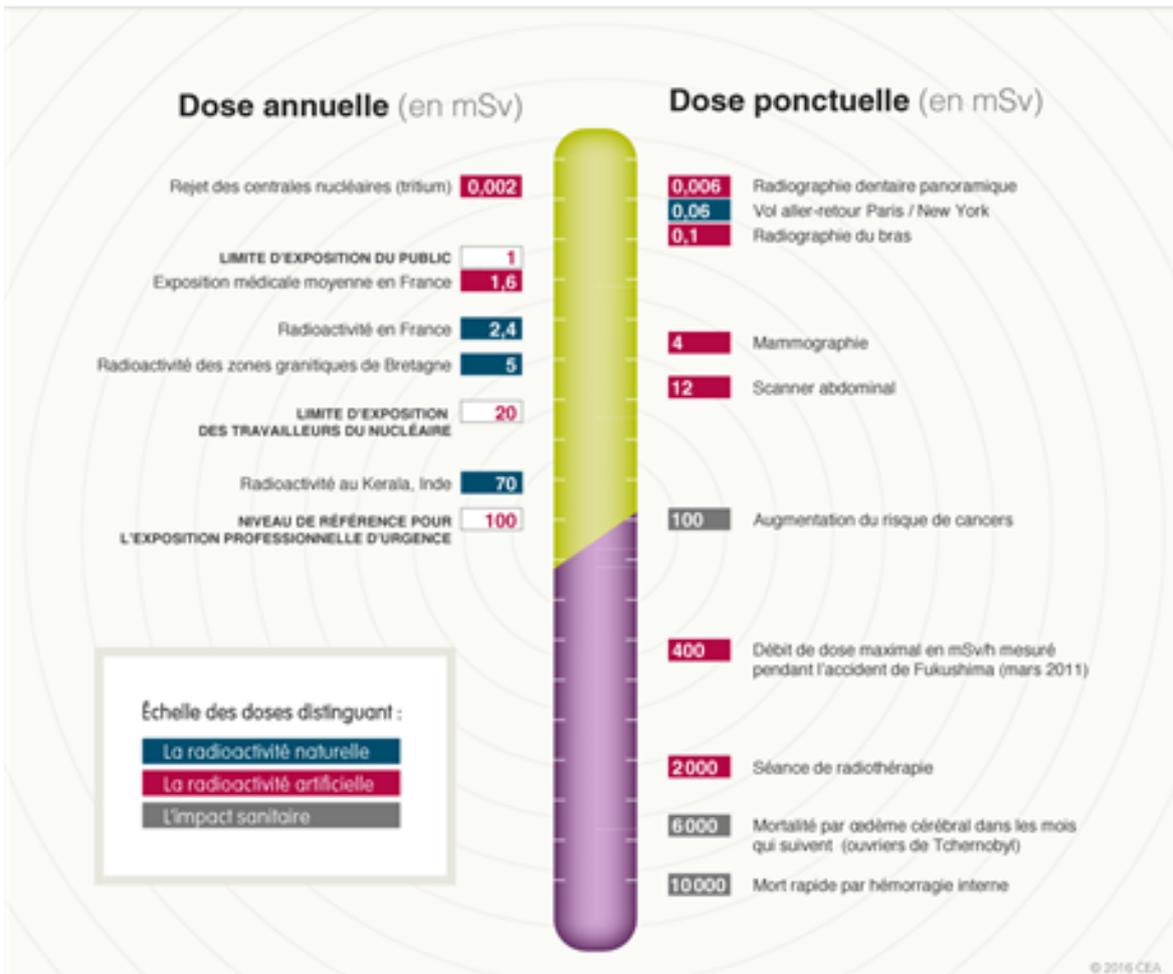
$$1 \text{ Gy correspond à } 1 \text{ J.m}^{-3}$$

♣ **Le sievert (Sv) :** Cette unité mesure l'impact biologique de la dose absorbée, qui dépend du type de rayonnement et du tissu biologique considéré. Elle est beaucoup utilisée en radiologie et en radiothérapie.



♣ **LA RELATION ENTRE LES TROIS UNITÉS DE MESURE** est bien illustrée par l'image d'un enfant qui lance des objets en direction d'un camarade. Le nombre d'objets envoyés équivaut au nombre de rayonnements émis par une source radioactive, c'est-à-dire son activité (en becquerels). Le nombre d'objets reçus par le camarade correspond à la dose absorbée (en grays). Les marques laissées sur son corps selon la nature des objets, lourds ou légers, est l'équivalent dose biologique (en sieverts).

## Échelle des doses



Pour plus d'information sur les unités :

<http://www.cea.fr/comprendre/Pages/radioactivite/essentiel-sur-grandeur-unites-radioactivite.aspx>

BIPM : <https://www.bipm.org/metrologie/ionizing-radiation/>

*Remarque :*

*Les unités utilisées dans "La supplication" ne sont plus guère usitées aujourd'hui :*

*– le röntgen mesure le taux d'ionisation, c'est-à-dire la charge induite par unité de volume par le passage de rayonnement  $\beta$  et  $\gamma$ . On peut le rapprocher du gray.*

*– le rem (röntgen équivalent man) mesure la dose absorbée ( 100 rem = 1 Sv).*

---

### Organismes publics liés au nucléaire :

IRSN Institut de Radioprotection et de sûreté nucléaire

<https://www.irsn.fr/FR/Pages/Home.aspx>

CEA Commissariat à l'énergie atomique

<http://www.cea.fr/>

ANDRA Agence Nationale pour la gestion des déchets radioactifs

<https://www.andra.fr/>

### Autres liens utiles :

Site dédié à la radioactivité

<https://www.laradioactivite.com/>

Description des différentes ressources énergétiques

<https://www.connaissancedesenergies.org/>

### À lire en bande dessinée :

Emmanuel LEPAGE, "Un printemps à Tchernobyl", ed Futuropolis

### Série :

– sur l'accident de Tchernobyl, la série produite par HBO :

"Tchernobyl"

– sur la mise au point de la première bombe atomique, la série produite par la chaîne américaine WGN :

"Manhattan"

### Théâtre :

– sur la découverte du radium par Pierre et Marie Curie, la pièce de Jean-Noël Fenwick :

"Les palmes de Monsieur Schutz"

### Vidéo YouTube :

– pour une présentation assez ludique de la radioactivité accompagnée de quelques jolies expériences de détection de rayonnement  $\alpha$  et  $\beta$

<https://www.youtube.com/watch?v=NtOJ2HhyBmQ&t=>

## Annexe :

Type d'élément	Radionucléide	Symbole	Période radioactive	Activité totale rejetée (x10 <sup>15</sup> Bq)
<b>Gaz inerte</b>	Xénon 133	133Xe	5,3 jours	6 290
<b>Éléments facilement volatils</b>	Iode 131	131I	8 jours	630-1740
	Césium 134	134Cs	2,2 ans	18-44
	Césium 137	137Cs	30,2 ans	37-90
	Tellure 132	132Te	78 heures	400-1000
<b>Éléments volatilité intermédiaire</b>	Ruthénium 103	103Ru	39,6 jours	170
	Ruthénium 106	106Ru	1 an	59
<b>Éléments peu volatils</b>	Strontium 90	90Sr	28 ans	8,1
	Strontium 90	90Sr	28 ans	8,1
	Baryum 140	140Ba	12,8 jours	180
<b>Éléments réfractaires (non volatils)</b>	Zirconium 95	95Zr	64 jours	155
	Cérium 141	141Ce	33 jours	144
	Cérium 144	144Ce	285 jours	137
	Neptunium 239	239Np	2,4 jours	1440
	Plutonium 238-239-240	Pu	-	~ 0,9
	Plutonium 241	241Pu	13,2 ans	5,9
	Curium 242	242 Cm	163 jours	~ 0,9

*Estimation de l'activité des principaux radionucléides rejetés lors de l'accident de Tchernobyl (Robeau, 2001)*