

Guillaume BLANC
& Camille Noûs

Physique et enjeux
de société

[https://doi.org/10.53480/
physique-societe.b046](https://doi.org/10.53480/physique-societe.b046)

Université Paris Cité

Publié sous licence
Creative Commons CC BY

© Guillaume BLANC 2023



Ouvrage publié sous licence Creative Commons Attribution License CC BY (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), qui autorise sans restrictions l'utilisation, la diffusion, et la reproduction sur quelque support que ce soit, sous réserve que la publication originale soit correctement citée : BLANC Guillaume & Noûs Camille, *Physique et enjeux de société* (Université Paris Cité, 2023). <https://doi.org/10.53480/physique-societe.b046>

La licence CC BY s'applique à l'ensemble de l'ouvrage sauf mentions contraires.

- La licence CC BY ne s'applique pas aux images reproduites avec la permission d'un tiers et soumises au droit d'auteur. Les images concernées sont identifiables par la mention en légende, du symbole © suivi de la désignation de l'ayant droit.
- Si une image est soumise à un autre régime de licence, celui-ci est mentionné en légende.

CC BY-SA	https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/
CC BY-NC	https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/
CC BY-NC-ND	https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/
CC BY-NC-SA	https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/
CC0 (domaine public)	https://creativecommons.org/publicdomain/zero/1.0/
Licence Ouverte	https://www.etalab.gouv.fr/licence-ouverte-open-licence/

Note de l'éditeur : ce manuel comporte un ensemble d'hyperliens vers des pages de sites internet. Leur validité ainsi que l'accès aux informations correspondantes ont été contrôlés en date du 1er février 2023.

Chapitre 2

Nucléaire et radioactivité

BLANC Guillaume & Noûs Camille, Nucléaire et radioactivité, in *Physique et enjeux de société* (Université Paris Cité, 2023). <https://doi.org/10.53480/physique-societe.d8819d>



Ce chapitre se propose de donner quelques notions succinctes de physique nucléaire pour comprendre ce qu'est la radioactivité, comprendre les grandes lignes de l'interaction des rayonnements ionisants, qu'ils soient issus de la radioactivité ou d'autres sources (désexcitation, fission, etc.), avec la matière et en particulier la matière vivante. Nous évoquerons alors la radioprotection et ses unités spécifiques. Nous terminerons avec quelques applications des rayonnements ionisants, et avec les principes de fonctionnement d'une centrale nucléaire.

2.1 Éléments de physique nucléaire

2.1.1 Introduction

Quand on parle du « nucléaire » dans les médias, on fait référence à la production d'énergie électronucléaire dans les centrales, et à toutes les problématiques annexes (déchets, prolifération, etc.). En physique, le « nucléaire » fait référence au noyau atomique. D'ailleurs la production d'énergie électronucléaire est issue d'une réaction « nucléaire » dite de *fission*. Il s'agit de la physique nucléaire, celle qui étudie les propriétés du noyau atomique ainsi que les réactions nucléaires. Le « nucléaire » des médias fait également référence à la *radioactivité* qui est une propriété physique des noyaux atomiques instables.

2.1.2 Un peu de physique nucléaire

Le noyau atomique

Le noyau atomique est constitué de neutrons et de protons qui sont les nucléons, eux-mêmes constitués de quarks et gluons, particules « élémentaires ». Les protons ont une charge électrique positive ($+e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ C, où e est la charge élémentaire) tandis que les neutrons sont neutres. Un noyau atomique a donc une charge positive.

On définit :

- Z est le **numéro atomique**, à savoir le nombre de protons (et d'électrons de l'atome neutre); il caractérise un élément.
- N est le **nombre de neutrons**, il peut varier pour un même élément.
- $A = Z+N$ représente le nombre total de nucléons; c'est le **nombre de masse**; c'est aussi la masse molaire de l'élément en $\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$ avec une très bonne approximation¹.
- Un noyau avec un couple (Z, N) donné est un **nucléide**.

1. Le nombre de masse correspond à peu près à la masse atomique ou masse molaire d'un atome car un nucléon a à peu près une masse molaire de 1 g/mol. Simplement parce que l'unité de quantité de matière du système international d'unités, la mole, était définie jusqu'en 2019 comme le nombre d'atomes dans 12 g de carbone 12. Depuis 2019, la mole est définie comme la quantité de matière d'un système contenant exactement $6,02214076 \cdot 10^{23}$ entités élémentaires. Cette définition est très proche de l'ancienne, ce qui fait que la masse molaire du carbone 12 est toujours de 12 g/mol mais désormais avec une incertitude de mesure expérimentale (de $4,5 \cdot 10^{-10}$). Donc les autres éléments ont une masse molaire proche de leur nombre de masse en g/mol. Proche et non égale car la masse d'un noyau atomique n'est pas égale à la somme des masses de ses constituants (protons et neutrons) à cause de l'énergie de liaison.

Un noyau atomique a donc une charge $+Ze$. Un atome est électriquement neutre, il contient donc un cortège de Z électrons de charge $-e$.

On représente le nucléide X de la façon suivante : A_ZX . Depuis 2016, la tableau périodique contient 118 éléments (IUPAC 2016). Fin 2020, 3312 nucléides avaient été découverts², dont 256 stables (correspondant à 80 éléments)³.

Un *isotope* est un nucléide avec le même nombre de protons (donc un même élément chimique), mais un nombre de neutrons différent. Par exemple : ${}^1_1\text{H}$ (hydrogène), ${}^2_1\text{H}$ (deutérium) et ${}^3_1\text{H}$ (tritium) sont trois isotopes de l'hydrogène.

Quelques ordres de grandeur

- Masse : on utilise souvent l'**électron-volt** (eV) qui est l'énergie d'un électron accéléré sur une différence de potentiel de 1 V soit : $e \times (1 \text{ V}) = 1,602176565 \cdot 10^{-19} \text{ J}$. C'est une unité de masse en raison de l'équivalence masse-énergie $E = mc^2$; la masse moyenne d'un nucléon est $1,6605402 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$.
- Taille : le rayon d'un noyau (considéré comme sphérique⁴) peut être approximé par $R = 1,1 \cdot 10^{-15} A^{1/3} \text{ m}$, où A est le nombre de masse. L'ordre de grandeur est ici le *fermi* ou femtomètre (fm) = 10^{-15} m soit la taille d'un atome divisée par 100 000.

Le tableau 2.1 donne quelques ordres de grandeur.

Énergie de liaison

L'énergie de liaison d'un noyau est l'énergie qu'il faut lui *fournir* pour séparer tous ses constituants. C'est donc l'*opposé* d'une *énergie potentielle d'interaction* qui est l'énergie à fournir pour transporter les nucléons au repos à l'infini jusqu'à former un noyau.

L'énergie totale d'un nucléide au repos (énergie de masse) est donnée par :

$$E^{\text{rePos}}(A, Z) = m_{{}^A_ZX}c^2 = Zm_p c^2 + Nm_n c^2 - E_L$$

où c est la vitesse de la lumière, $m_{{}^A_ZX}$ est la masse du nucléide, m_p est la masse d'un proton, m_n est la masse d'un neutron et E_L est l'énergie de liaison. Ainsi, on a :

$$E_L = (Zm_p + Nm_n - m_{{}^A_ZX})c^2 > 0$$

où l'on voit que l'énergie de liaison est la différence entre l'énergie de masse du nucléide et celle de chacun de ses constituants : la masse d'un noyau atomique est *inférieure* à la somme des masses des nucléons qui le constituent.

L'ordre de grandeur des énergies de liaison nucléaires est le MeV (tandis que les énergies de liaison des électrons dans un atome sont exprimées en eV ou keV), voir le tableau 2.2.

La figure 2.1 montre que, hormis pour les noyaux les plus légers, on a : $E_L/A \sim 8 \text{ MeV}$. Il faut donc dépenser environ 8 MeV pour extraire un nucléon du noyau. Cette figure montre que les noyaux les plus stables sont ceux autour du minimum de l'énergie potentielle (ou autour du maximum de l'énergie de liaison) : le noyau le plus stable (le plus lié) est le fer 56 au minimum de la courbe. Les noyaux très légers ou très lourds sont moins liés.

2. Voir : <https://people.nsl.msui.edu/~thoennes/isotopes/index.html>.

3. Voir : https://fr.wikipedia.org/wiki/Isotope_stable

4. Il s'agit là d'une approximation.

	masse (MeV/c ²)	rayon (m)
atome (⁴ ₂ He)		$1,28 \cdot 10^{-10}$
noyau (⁴ ₂ He)	3738,4	$\sim 1,74 \cdot 10^{-15}$
électron	0,511	$< 10^{-22}$
proton	938,272	$0,88 \cdot 10^{-15}$
neutron	939,565	? ($\sim 10^{-15}$)

TABLE 2.1 – Masses et tailles des constituants atomiques. Notons que l'électron est une particule élémentaire, stable. Le proton et le neutron ne sont pas élémentaires (composés de quarks) : le premier est stable à l'état libre, tandis que le neutron est instable à l'état libre (hors du noyau), sa demi-vie est de 15 min.

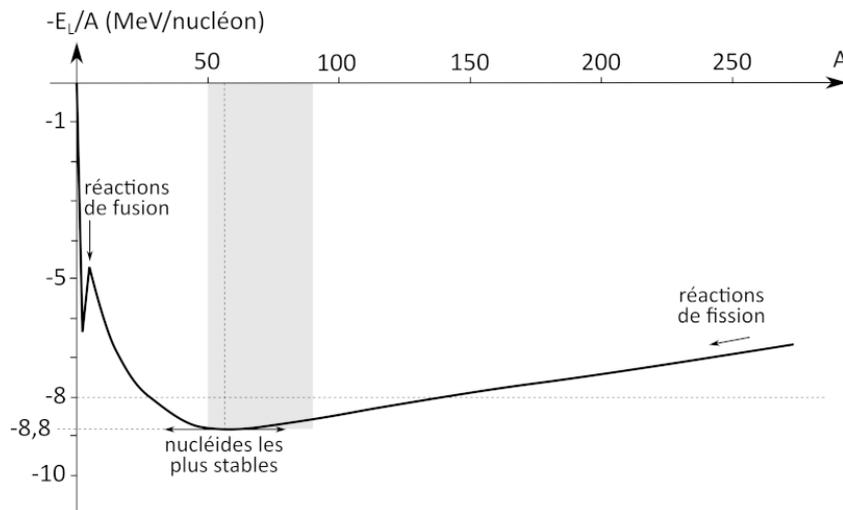


FIGURE 2.1 – Opposé de l'énergie de liaison (ou énergie potentielle d'interaction des nucléons) moyenne par nucléon ($-E_l/A$) en fonction du nombre de nucléons A dans le noyau (courbe d'Aston).

Si on casse un noyau très lourd en deux (réaction de **fission** nucléaire), les morceaux sont plus liés (énergie de liaison par nucléon plus importante), donc une partie de l'énergie de liaison du gros noyau est évacuée : la réaction est **exothermique**. Inversement, fusionner deux noyaux lourds nécessite un apport d'énergie, par exemple sous forme d'énergie cinétique à l'aide d'un accélérateur.

Si on arrive à fondre (fusionner) deux noyaux légers entre eux (réaction de **fusion** nucléaire), ils vont former un noyau plus lourd, qui sera plus lié, donc une partie de l'énergie de liaison des deux noyaux légers est évacuée : la réaction est **exothermique**.

Les interactions en jeu

Deux forces antagonistes sont à l'œuvre pour maintenir l'édifice des nucléons au sein du noyau :

- La *force électromagnétique* (ou électrostatique dite force de Coulomb) qui engendre une répulsion des protons entre eux (chargés positivement) à longue portée.
- La *force nucléaire forte* qui lie les nucléons – les quarks plus exactement – entre eux (s'ils sont très proches, car c'est une force à très courte portée, de l'ordre de 1,5 fm), avec une intensité $\sim 10^2$ plus forte que l'interaction électromagnétique.

	Énergie de liaison des électrons dans l'atome (MeV)	Énergie de liaison des nucléons dans le noyau (MeV)
${}^1_1\text{H}$	0,000014	0
${}^2_1\text{H}$	0,000014	2,225
${}^4_2\text{He}$	0,000079	28,295
${}^7_3\text{Li}$	0,00019	39,244
${}^{16}_8\text{O}$	0,0020	127,617
${}^{35}_{17}\text{Cl}$	0,012	298,20
${}^{57}_{26}\text{Fe}$	0,034	499,90
${}^{235}_{92}\text{U}$	0,69	1783,17

TABLE 2.2 – Comparaison entre l'énergie de liaison des électrons dans l'atome et l'énergie de liaison nucléaire pour quelques éléments et isotopes.

Les autres interactions connues sont :

- La *force faible*, responsable de la radioactivité β . Elle change la saveur des quarks et donc la nature – neutron ou proton – des nucléons, mais ne provoque pas d'état lié comme les autres interactions. Sa portée est typiquement 100 fois plus faible que celle de l'interaction forte. Son intensité est typiquement 10^4 fois moins forte que l'interaction électromagnétique aux énergies de l'ordre du MeV, mais elle est du même ordre de grandeur – de l'ordre d'une centaine de GeV (interaction électrofaible).
- La *force gravitationnelle*, négligeable dans les interactions nucléaires.

Selon sa quantité de protons et de neutrons, un noyau atomique peut être en équilibre parfait auquel cas il est stable. Si son équilibre est imparfait, il est instable. Il va modifier spontanément sa structure interne pour revenir vers la stabilité. Il émet alors un rayonnement particulière : il est radioactif. Le terme de « rayonnement » est trompeur car il ne s'agit pas (uniquement) de rayonnement électromagnétique (comme pour un atome instable qui émet des photons pour revenir à la stabilité), mais aussi d'émission de particules (matière ou photons).

La vallée de stabilité

La représentation des différents noyaux connus dans un graphe représentant le nombre N de neutrons en fonction du nombre Z de protons permet de mettre en évidence la ligne ou courbe de stabilité, peuplée par les noyaux stables (en noir à la figure 2.2a).

La forme courbée de la vallée de stabilité résulte des contributions des deux forces à l'œuvre au sein du noyau : la force forte et la force électromagnétique. La première tend à favoriser $N = Z$ (donc sur la diagonale), tandis que la seconde favorise $N = A$ et tend à maximiser le nombre de neutrons. Si on constate un excès de neutrons pour $Z \gtrsim 20$, c'est parce que l'interaction électromagnétique, répulsive entre les protons, cesse d'être négligeable (Valentin 1986).

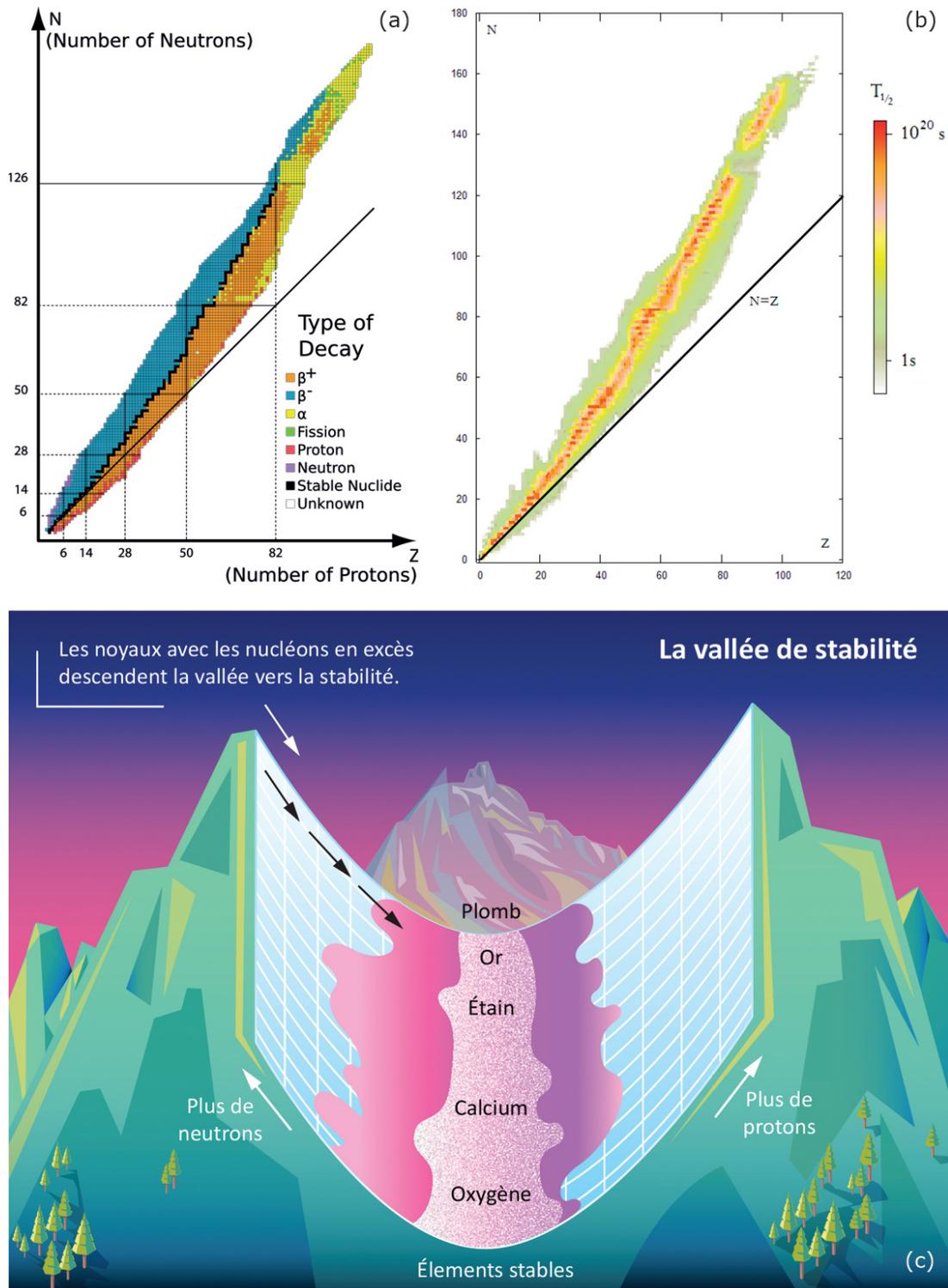


FIGURE 2.2 – Illustrations de la vallée de stabilité des noyaux atomiques. (a) Représentation du nombre de neutrons en fonction du nombre de protons pour les nucléides connus. Les couleurs représentent le type de radioactivité par lequel les noyaux instables se désintègrent. Source : Wikipédia/Napy1kenobi. CC BY-SA. (b) Représentation du nombre de neutrons en fonction du nombre de protons pour les nucléides connus. Les couleurs représentent la période de désintégration radioactive en secondes : les noyaux stables sont en rouge! CC0. (c) Schéma illustrant le fait que les noyaux trop riches en neutrons ou en protons par rapport au « standard » de la stabilité vont devoir se désintégrer. Crédit : Julia Fraud. CC BY-NC-ND.

Sur la figure 2.2a, au-dessus 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-dessous des noyaux stables, on trouve en orange 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 vont revenir vers la ligne de stabilité par désintégration α (en jaune). Enfin, les noyaux très lourds (en vert) fissionnent spontanément en donnant naissance à des produits de désintégration légers (généralement radioactifs car en dehors de la vallée de stabilité).

Loi de décroissance radioactive

Les noyaux *instables* vont donc émettre un rayonnement énergétique sous forme de particules ou de photons. L'instant précis de la désintégration d'un noyau isolé est impossible à prévoir. On peut seulement lui associer une probabilité de se désintégrer spontanément pendant une unité de temps.

On définit la **constante radioactive** λ (en seconde⁻¹) comme la probabilité de désintégration d'un noyau par unité de temps. C'est une propriété physique d'un nucléide indépendante des conditions physico-chimiques de l'atome correspondant.

On ne peut pas connaître précisément l'évolution temporelle d'un seul noyau instable ; en revanche, on peut connaître statistiquement l'évolution d'un grand nombre de noyaux issus d'un même nucléide.

Ainsi, pour N noyaux instables à un instant initial, il en disparaît λN au bout d'une unité de temps (typiquement la seconde). Pendant un intervalle de temps dt ce sont donc $\lambda N dt$ noyaux qui disparaissent, ou encore :

$$-dN = N(t) - N(t + dt) = \lambda N dt$$

soit :

$$-\frac{dN}{dt} = \lambda N \quad (2.1)$$

ou encore :

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

En intégrant cette équation différentielle, on obtient :

$$-\ln N = \lambda t + \text{Cte}$$

Avec la condition initiale suivante : à $t = 0$, on a $N(0) = N_0$, on obtient que $\text{Cte} = -\ln N_0$, d'où

$$\ln \frac{N}{N_0} = -\lambda t$$

ou encore :

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t} \quad (2.2)$$

Le nombre de noyaux instables décroît ainsi de manière exponentielle au cours du temps.

Le produit λN est aussi la **vitesse de désintégration** ($-dN/dt$) d'une quantité déterminée d'une substance radioactive. On l'appelle l'**activité** \mathcal{A} de cette substance :

$$\mathcal{A} = \lambda N \quad (2.3)$$

On a donc :

$$\mathcal{A}(t) = \mathcal{A}_0 e^{-\lambda t}$$

où \mathcal{A}_0 est l'activité à $t = 0$.

L'activité d'un radionucléide se mesure en becquerels (Bq). Un Bq étant une désintégration par seconde. C'est une unité assez faible qui nécessite l'emploi de multiples : MBq, GBq ou TBq, par exemple.

Période radioactive

La caractérisation la plus commode de la durée de vie d'un ensemble de nucléides identiques est la *période radioactive ou demi-vie*⁵ T , à savoir la durée au terme de laquelle la moitié du nombre initial N_0 de noyaux s'est désintégrée.

Ainsi :

$$N(t = T) = N_0/2 \text{ avec } \ln \frac{N_0}{N} = \lambda t$$

soit :

$$\ln 2 = \lambda T$$

d'où :

$$T = \frac{\ln 2}{\lambda} \text{ donc } N(t) = N_0 e^{-t \ln 2 / T} \quad (2.4)$$

Par exemple, la période radioactive du carbone 14 est de 5730 ans ; celle de l'uranium 238 est de 4,5 milliards d'années, ce qui signifie que la moitié de l'uranium 238 initialement présent à la naissance la Terre a disparu.

Le nombre de nucléides d'un élément radioactif diminue d'un facteur ~ 1000 toutes les 10 périodes ($N_0/2^{10} = N_0/1024$).

Les périodes des éléments radioactifs connus actuellement vont de $0,07 \mu\text{s}$ (actinium 217) à $1,5 \cdot 10^{24}$ ans (tellure 128).

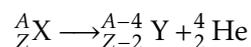
2.1.3 Les différentes radioactivités

Les noyaux instables se désintègrent en émettant une ou des particules qui sont spécifiques à la nature du noyau émetteur. L'énergie de liaison perdue dans le réarrangement du noyau se retrouve en partie dans l'énergie cinétique des particules émises.

On observe en majorité les différentes émissions suivantes :

→ Désintégration α

Il s'agit de l'émission spontanée d'un noyau d'hélium 4 par certains noyaux lourds ($A > 200$) :

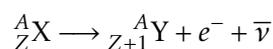


La particule α émise (noyau d'hélium) a une énergie cinétique de l'ordre de 6 MeV en moyenne (moins de 10 MeV). La particule α émise a une énergie bien définie, le spectre énergétique de noyaux émetteurs α est donc un spectre de raies.

La radioactivité α est régie par l'interaction nucléaire forte.

→ Désintégration β

Il s'agit de l'émission spontanée d'un électron (particule β^-) ou d'un positon (particule β^+) :



où e^- est un électron et $\bar{\nu}$ est un anti-neutrino ; dans cette réaction un neutron est transformé en proton.

5. La dénomination de *demi-vie* est ambiguë, car elle ne signifie pas que la durée de vie est le double de cette valeur !



où e^+ est un positon et ν est un neutrino; dans ce cas, c'est un proton qui est transformé en neutron.

Les énergies cinétiques de Y , e^+ , e^- , ν , $\bar{\nu}$ sont en général de l'ordre du MeV. Ces énergies se répartissent sur l'ensemble des particules émises, l'énergie des électrons ou positons émis n'est pas définie, le spectre énergétique des électrons est donc continu.

Les particules ν et $\bar{\nu}$, neutrino et anti-neutrino, sont des particules de faible masse interagissant très peu avec la matière.

L'émission β est régie par l'interaction faible.

→ Émission γ

Il s'agit de l'émission spontanée d'un photon γ émis par un noyau dans un niveau d'énergie « excité », c'est-à-dire au-dessus du niveau fondamental. Son énergie est bien définie et est de l'ordre de 0,1 à 1 MeV, tandis que les photons émis dans les transitions atomiques ont au plus une énergie de l'ordre du keV. Le spectre énergétique des photons émis est un spectre de raies.

L'émission de photons γ est régie par l'interaction électromagnétique.

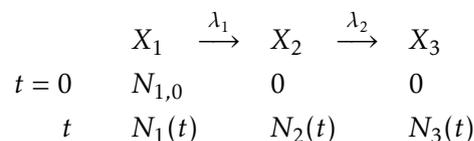
Ces différentes radioactivités sont illustrées à la figure 2.3. Il existe d'autres façons plus marginales pour certains noyaux de se désintégrer : conversion interne, capture électronique, fission spontanée...

Rapport d'embranchement

Certains radionucléides peuvent se désintégrer de différentes façons. On peut mesurer et donc tabuler les probabilités qu'ils ont de se transformer par telle ou telle voie. Par exemple, la figure 2.4 montre que le bismuth 212 a 64 % de chances de se désintégrer par émission d'un β et 36 % de chances de se désintégrer en émettant un α .

Filiations radioactives

La désintégration d'un noyau radioactif ne donne pas nécessairement un noyau stable, mais peut conduire à un noyau lui-même radioactif qui est son fils et qui aura des descendants dont le dernier sera stable. Pour deux corps en filiation, il est assez simple de calculer analytiquement les quantités des descendants à chaque instant. En revanche, pour plus de deux corps, c'est bien plus compliqué, mais faisable numériquement. Par exemple, dans le cas :



où λ_1 est la constante radioactive caractérisant le noyau X_1 et λ_2 est la constante radioactive caractérisant le noyau X_2 . On peut calculer analytiquement l'évolution de chacune des quantités $N_1(t)$, $N_2(t)$ et $N_3(t)$ des nucléides X_1 , X_2 et X_3 , respectivement, en fonction du temps.

Radioactivité naturelle

Dans la nature on trouve environ 50 isotopes radioactifs. La moitié se trouvent sur notre planète depuis sa formation car leur durée de vie est suffisamment longue (quelques milliards d'années). Il s'agit notamment de l'uranium, du thorium et de leurs descendants. L'autre moitié est fabriquée en permanence par la collision des rayons cosmiques avec les atomes de la haute atmosphère, comme le carbone 14.

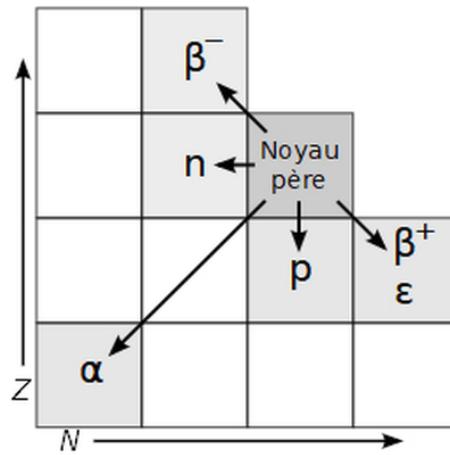


FIGURE 2.3 – Illustration des différentes radioactivités sur un graphe du nombre de neutrons N en fonction du nombre de protons Z : radioactivités α , β^- , radioactivité β^+ , capture électronique ϵ (ou désintégration β inverse), émission de neutrons n et de protons p . Source : Wikipédia/Ariel Provost. CC BY-SA.

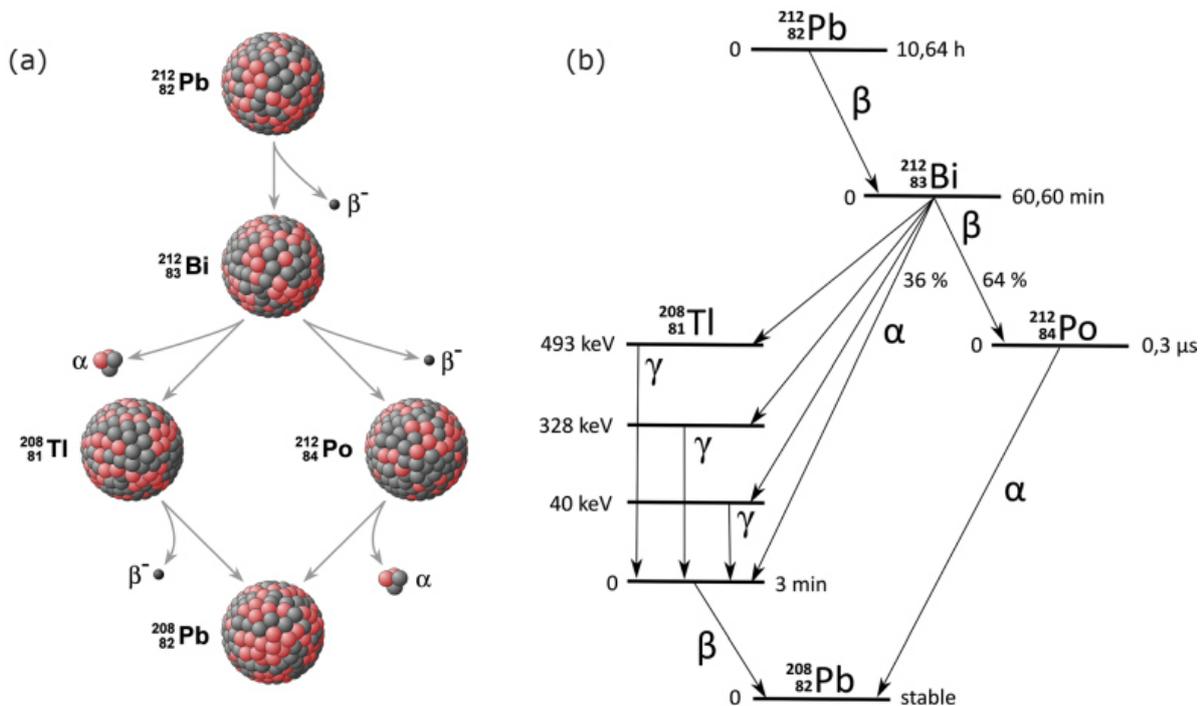


FIGURE 2.4 – Exemple de la filiation du plomb 212. (a) Sous forme de schéma. Source : Eugene Alvin Villar (2008), <https://commons.wikimedia.org/wiki/User:Seav>. CC BY-SA. (b) Sous forme de graphe. Les données sur les différents isotopes connus sont tabulées sous cette forme, avec les énergies des différents niveaux, les périodes, les probabilités de désintégration.

Un mètre carré de sol (sur 1 m de profondeur) recèle en moyenne 70 000 Bq de potassium 40, et reçoit chaque seconde 2500 atomes de tritium et 22 000 atomes de carbone 14. Le corps humain renferme lui aussi du carbone 14 (environ 50 Bq/kg), et du potassium 40 (environ 60 Bq/kg).

2.2 Interaction des rayonnements ionisants avec la matière

On considère ici différents rayonnements « ionisants », c'est-à-dire capables d'arracher un ou plusieurs électrons et de produire un ion :

- les particules émises par la radioactivité : α , β , γ (à l'exception des neutrinos);
- les neutrons que l'on trouve dans l'environnement d'une centrale nucléaire, mais pas seulement : à proximité des sources primaires de neutrons⁶, ou des accélérateurs de particules;
- les rayons X fréquemment utilisés en médecine (radiographie, scanner, etc.), en recherche avec la diffraction par rayons X (comme sur le synchrotron Soleil), ou à proximité des accélérateurs (rayonnement de freinage ou *bremsstrahlung* en allemand qui est un rayonnement électromagnétique généré par le ralentissement de particules chargées).

La matière est celle qui se trouve sur la trajectoire de ces particules, elle peut être inerte ou vivante.

2.2.1 Introduction

La matière rencontrée est composée d'atomes (électriquement neutres) qui sont constitués de noyaux chargés positivement, lourds (constitués de quelques nucléons à quelques centaines de nucléons) et d'électrons, beaucoup plus nombreux (autant que les protons), légers (environ 1/1830 la masse d'un nucléon) et chargés négativement.

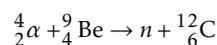
On peut classer ces interactions selon différents critères.

- Selon *la nature du rayonnement* :
 - ▶ flux de particules matérielles douées de masses au repos,
 - ▶ flux de photons (de masse nulle).
- En fonction de *la cible* (noyaux ou électrons) :
 - ▶ particules chargées : les interactions de type coulombiennes⁷ sont plus fréquentes avec les électrons qu'avec les noyaux,
 - ▶ particules neutres (neutrons) : elles dissipent leur énergie cinétique efficacement lors de collisions avec les noyaux (et par capture pouvant induire des fissions),
 - ▶ les photons : les effets sont différents selon qu'ils rencontrent les électrons ou les noyaux.
- Selon *l'effet sur le milieu* (biologie, radioprotection) :
 - ▶ rayonnement ionisant (dont l'énergie est suffisante pour arracher un électron aux atomes du milieu rencontré),
 - ▶ rayonnement non ionisant.

Remarques :

1. L'énergie d'ionisation est l'énergie minimale nécessaire pour détacher complètement un électron orbital des atomes ou molécules du milieu irradié à savoir $\sim 11,5$ à $14,5$ eV compte tenu des principaux atomes rencontrés (H, C, N et O)⁸.

6. Comme le mélange américium, émetteur α , et béryllium :



Ce type de source est utilisé pour différentes applications comme l'amorçage des réactions de fission dans un réacteur nucléaire, en recherche, etc.

7. L'interaction coulombienne est la force $F(r)$ entre deux particules de charges q_1 et q_2 : $F(r) = \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon_0} \times \frac{1}{r^2}$, où r est la distance entre les deux particules et ϵ_0 est la permittivité du vide.

8. Pour les énergies d'ionisation de tous les éléments, voir par exemple :

https://fr.wikipedia.org/wiki/énergie_d'ionisation#Valeurs_numériques_des_énergies_d'ionisation.

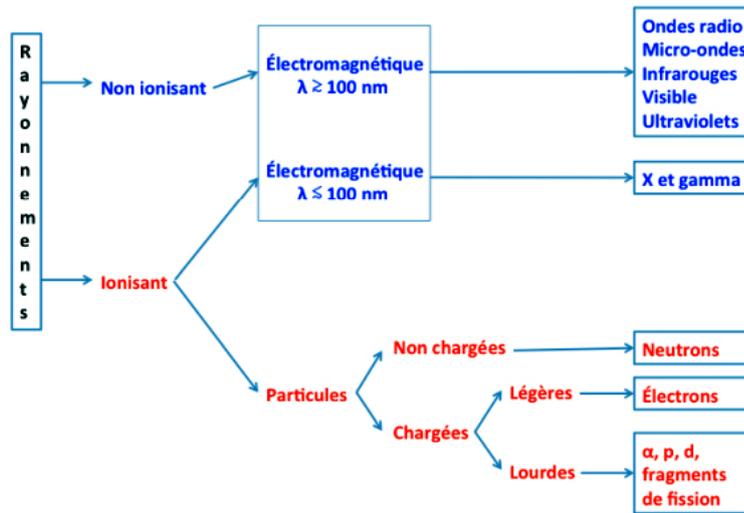


FIGURE 2.5 – Résumé schématique des différents rayonnements, particulaires ou non, ionisants ou non.

2. **Tous les rayonnements particulaires dont il est question ici sont ionisants.**⁹

3. Les rayonnements électromagnétiques ionisants sont ceux de longueur d'onde inférieure à $0,1 \mu\text{m}$ (X et γ) ou d'énergie¹⁰ supérieure à 12 eV.

La figure 2.5 résume le paysage des différents rayonnements, particulaire ou non, ionisant ou non.

Le rayonnement électromagnétique

Le rayonnement électromagnétique est émis par la matière. Il est lié au mouvement des charges électriques qui la composent (électrons pour les atomes, nucléons pour les noyaux atomiques). Toute charge en mouvement crée en tout point de l'espace un champ électrique et un champ magnétique, perpendiculaires, qui se propagent à vitesse constante dans le vide ($c = 2,99792 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$), à savoir une onde électromagnétique.

Le rayonnement électromagnétique (voir figure 2.6) est caractérisé par son énergie $E = h\nu$ où $h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ est la constante de Planck et ν la fréquence de l'onde :

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad (2.5)$$

Soit :

$$E_{(\text{eV})} \simeq \frac{6,6 \cdot 10^{-34} \times 3 \cdot 10^8}{1,6 \cdot 10^{-19} \times 10^{-9}} \times \frac{1}{\lambda} \simeq \frac{1240}{\lambda_{(\text{nm})}} \quad (2.6)$$

Atténuation des photons

L'affaiblissement d'un faisceau de photons monoénergétiques sur une cible formée d'un matériau dépend de :

- l'épaisseur de la cible ;
- la nature et l'état physique de la cible ;

9. Il est bien évident que de nombreuses particules élémentaires énergétiques ne sont pas ionisantes : neutrinos, muons, etc.

10. Voir l'équation (2.5).

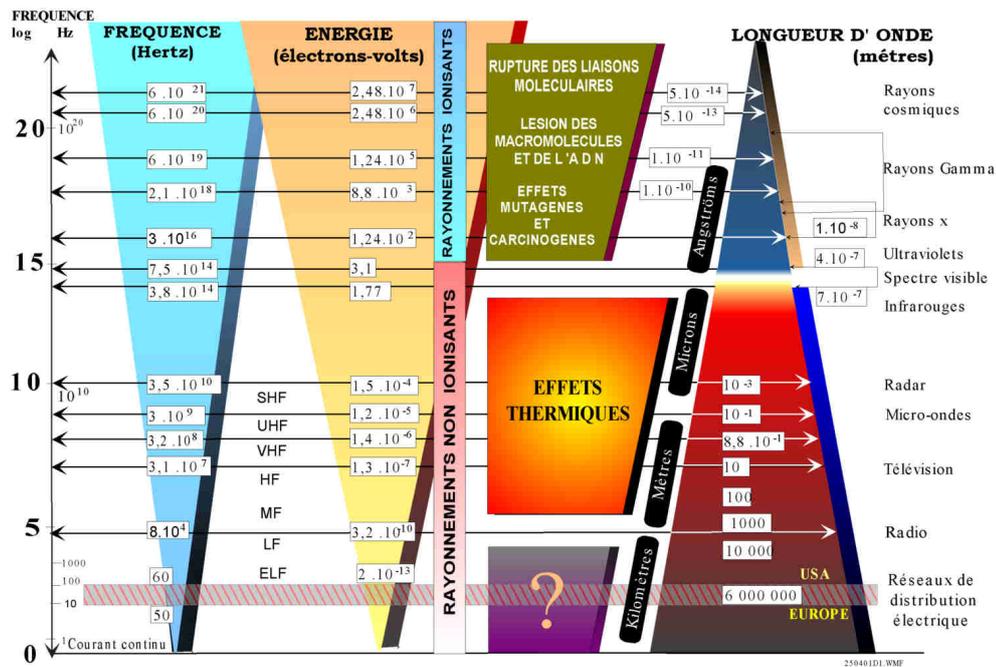


FIGURE 2.6 – Illustration des différents domaines du spectre électromagnétique avec le caractère ionisant ou non des photons correspondants. Source : https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Conclu_spectre.jpg. CC BY-SA.

→ l'énergie et le nombre des photons incidents.

Le nombre ($-dN$) de photons éliminés du faisceau après une épaisseur dx de cible est proportionnel au nombre N de photons incidents et à dx :

$$-dN = \mu N dx$$

où μ dépend du matériau de la cible et de l'énergie des photons incidents.

En intégrant :

$$N(x) = N_0 e^{-\mu x}, \quad (2.7)$$

où N_0 est le nombre de photons incidents, $N(x)$ est le nombre de photons restant après la traversée de l'épaisseur x , et μ est le **coefficient d'atténuation linéique** (en m^{-1}). L'atténuation d'un faisceau de photons dépend ainsi exponentiellement de l'épaisseur de matériau.

On définit également la couche de demi-atténuation (CDA ou $X_{1/2}$) qui est l'épaisseur de matière dans laquelle la moitié des photons ont disparu :

$$CDA = \frac{\ln 2}{\mu}$$

Le coefficient d'atténuation linéique μ dépend aussi de l'état physique du matériau (liquide ou vapeur, par exemple), c'est pourquoi on tabule généralement la grandeur μ/ρ (coefficient massique d'atténuation), ρ étant la masse volumique de l'écran. On trouvera quelques valeurs de ces quantités pour quelques matériaux utilisés en radioprotection, dans le tableau 2.3.

Le tableau 2.3 montre que pour des photons de 1 MeV, on a $\mu/\rho \sim 0,07 \text{ cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$, donc $CDA \sim 10/\rho$ (cm). Si on veut une atténuation d'un facteur $32 = 2^5$, il faut traverser 5 fois la couche de demi-atténuation, soit une épaisseur de : $e_{32} = 50/\rho$ (cm). Ce qui correspond à environ 50 cm d'eau ou bien 4,4 cm de plomb.

C'est pourquoi dans un cabinet de radiologie médicale (les rayons X sont moins énergétiques que les rayons γ : 10 à 150 keV), on se protège avec des boucliers en plomb.

	Pb	Fe	eau	béton ordinaire
μ (cm ⁻¹)	0,79	0,47	0,07	0,15
CDA (cm)	0,88	1,47	9,90	4,62
ρ (g·cm ⁻³)	11,30	7,85	1,00	2,30
$\frac{\mu}{\rho}$ (cm ² ·g ⁻¹)	0,07	0,06	0,07	0,065

TABLE 2.3 – Quelques valeurs du coefficient d'atténuation linéique μ , de la couche de demi-atténuation, CDA, de la masse volumique ρ et du coefficient massique d'atténuation μ/ρ pour quatre matériaux généralement utilisés en radioprotection et pour un faisceau de photons γ de 1 MeV.

Rayonnement particulaire

Le « rayonnement » particulaire est typiquement un faisceau de particules projectiles qui sont caractérisées par :

- leur charge électrique (multiple entier de la charge élémentaire : $e = 1,6 \times 10^{-19}$ C),
- leur masse au repos m_0 ,
- leur énergie totale $E = mc^2 = m_0c^2 + E_c$, où E_c est leur énergie cinétique.

On distingue les *particules chargées* (et parmi elles, celles qui sont lourdes : protons, deutons, α , fragments de fission chargés positivement, de celles qui sont légères : électrons), ralenties par interactions coulombiennes avec les électrons des atomes de la matière irradiée, et les *neutrons* qui vont n'interagir qu'avec les noyaux des atomes de la matière.

Ralentissement des particules chargées lourdes

Il faut des dizaines de milliers d'interactions coulombiennes avec des électrons pour ralentir les particules. Chaque électron rencontré reçoit une toute petite fraction de l'énergie de la particule incidente.

Par exemple une particule α émise par le radium 226 a une énergie de 4,78 MeV et va communiquer à un électron une énergie maximale de 2,6 keV : il faut donc près de 2000 interactions pour l'épuiser ! L'électron recevant une partie de l'énergie de la particule incidente peut soit être éjecté de l'atome (et éventuellement ioniser d'autres atomes à son tour), soit changer d'orbite excitant ainsi l'atome cible.

Parcours moyens dans la matière

Plus concrètement, on peut définir la distance moyenne parcourue par des particules dans la matière par des lois empiriques.

Ainsi le parcours dans l'air de particules α d'énergie entre 4 et 10 MeV, dans les conditions normales de température et de pression (CNTP, c'est-à-dire à une température de 0 °C et une pression de 1 atm) :

$$R_{(\text{cm})}^{\alpha} = 0,32 \times E_{(\text{MeV})}^{1,5}$$

Pour des protons¹¹ de 10 à 200 MeV, dans l'air (CNTP) :

$$R_{(\text{cm})}^p = 1,8 \times E_{(\text{MeV})}^{1,8}$$

11. Il existe un type de radioactivité où certains noyaux instables se désintègrent en émettant un proton, mais elle est marginale. Les protons sont plus souvent produits au cours de réactions nucléaires.

La règle de Bragg permet d'extrapoler, pour un type de particule donné, à partir d'un matériau (1), dans un autre matériau (2) :

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{\rho_2}{\rho_1} \sqrt{\frac{A_1}{A_2}},$$

où $R_{1,2}$ est le parcours moyen pour dans les matériaux (1) et (2), $\rho_{1,2}$ est leur masse volumique et $A_{1,2}$ le nombre de masse de leurs constituants.

Ralentissement des électrons

Les électrons sont assez souvent relativistes : pour que leur vitesse soit telle que $v > 0,1 \times c$ (limite relativiste), il faut que leur énergie (cinétique) soit $E > 50$ keV. Tandis que pour être relativistes, des protons doivent avoir une énergie $E > 90$ MeV, et des α , $E > 350$ MeV!

De plus, les électrons sont de masse égale à celle des particules rencontrées (cortèges électroniques des atomes).

Ainsi :

- les **électrons de faible énergie** perdent de l'énergie par ionisation et excitation du milieu traversé, avec une déviation importante de la direction initiale (contrairement aux particules lourdes) ;
- les **électrons de grande énergie** perdent leur énergie par rayonnement (électromagnétique) de freinage (*bremsstrahlung*) du fait de la décélération subie lors de leur passage dans le champ coulombien du noyau.

Pour les électrons émis par radioactivité, relations empiriques suivantes s'appliquent (attention aux unités!) (Foos 2009) :

- pour $E_{\max\beta} < 0,8$ MeV : $R_{\beta(\text{g}\cdot\text{cm}^{-2})} = 0,407 \times (E_{\max\beta(\text{MeV})})^{1,38}$
- pour $0,8 < E_{\max\beta} < 3,7$ MeV : $R_{\beta(\text{g}\cdot\text{cm}^{-2})} = 0,542 \times (E_{\max\beta(\text{MeV})}) - 0,133$

où $E_{\max\beta(\text{MeV})}$ est l'énergie *maximale* des électrons émis par la radioactivité β (en MeV).

On obtient des longueurs (parcours moyens) en divisant par la masse volumique :

$$L_{(\text{cm})} = \frac{R_{\beta(\text{g}\cdot\text{cm}^{-2})}}{\rho(\text{g}\cdot\text{m}^{-3})}$$

Effet Tcherenkov

Quand des particules chargées se déplacent dans un milieu transparent à la lumière, à une vitesse supérieure à celle de la lumière dans ce milieu (c/n), un rayonnement électromagnétique appelé rayonnement Tcherenkov¹² est émis : le passage de la particule chargée induit une polarisation électrostatique sur les molécules du milieu. Comme la particule se déplace plus rapidement que les ondes électromagnétiques, les dipôles induits n'ont pas le temps de se relaxer immédiatement, ils s'accumulent, et c'est en se relaxant collectivement qu'ils émettent un rayonnement continu, polarisé, dont l'intensité décroît avec la longueur d'onde (d'où la lumière bleue) (Jackson 2021).

Dans l'eau, il faut que les électrons aient une énergie supérieure à 0,26 MeV pour qu'un rayonnement Tcherenkov apparaisse, ce qui est fréquent (contre 478 MeV pour des protons, beaucoup moins fréquent).

Cet effet est responsable de la coloration bleutée prise par l'eau des piscines de stockage de sources radioactives.

12. Voir, par exemple : https://fr.wikipedia.org/wiki/Effet_Vavilov-Tcherenkov.

Ralentissement des neutrons

Les neutrons ne sont pas produits par la radioactivité mais par des réactions nucléaires comme les réactions de fission dans les réacteurs nucléaires.

Ils ont deux principaux processus d'interaction avec la matière.

- Par **diffusion** conduisant à une modification de la trajectoire et à une perte d'énergie pour le neutron incident; elle peut être :
 - ▶ **élastique** si toute l'énergie perdue se retrouve sous forme d'énergie cinétique du noyau choqué; plus la masse du noyau choqué est proche de celle du neutron, plus celui-ci perdra d'énergie;
 - ▶ **inélastique** si une partie de l'énergie sert à exciter le noyau.
- Par **capture** (favorisée pour les neutrons thermiques, $E < 1$ eV), où le neutron incident est absorbé par le noyau choqué, qui se désexcite ensuite par émission d'un photon γ .

C'est pourquoi, pour se protéger des neutrons, on utilise des matériaux de faible masse atomique, contenant beaucoup d'hydrogène, comme l'eau ou le béton.

Rayonnement	Profondeur de pénétration matière solide	matériaux de Z faible	matériaux de Z élevé
α	10-20 microns		
β	quelques mm		
neutron	quelques 10 cm	forte absorption	faible absorption
γ	quelques 10 cm	faible absorption	forte absorption

TABLE 2.4 – Résumé des différentes façons d'absorber des particules selon leur nature et celle du matériau absorbant.

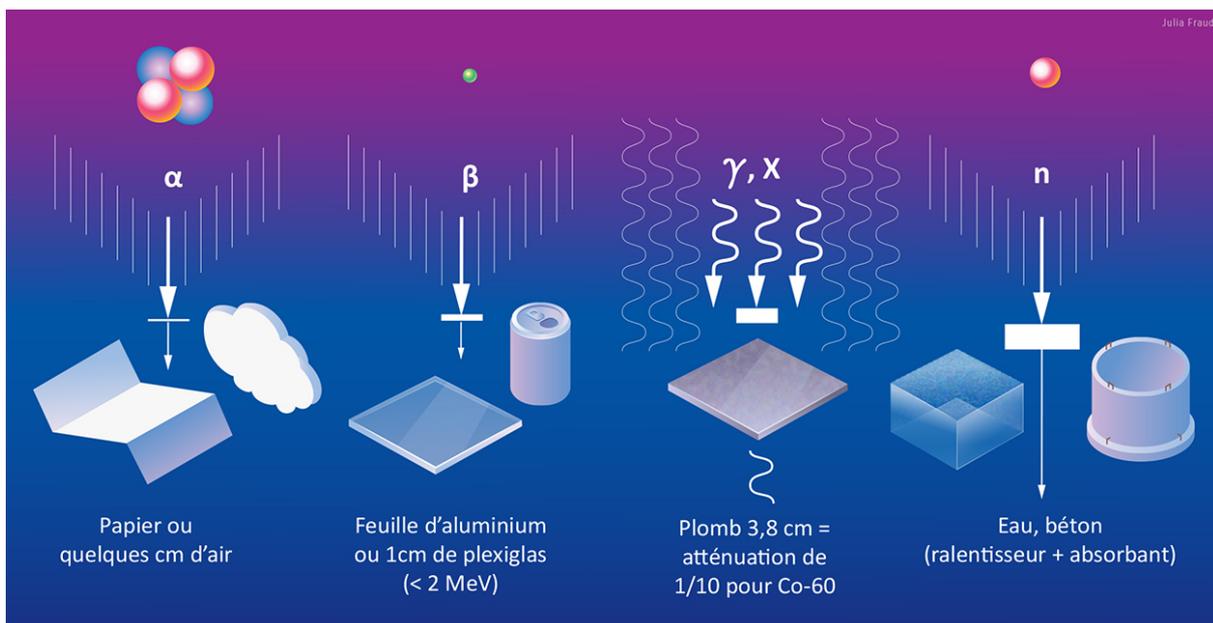


FIGURE 2.7 – Illustration des différentes façons d'absorber des rayonnements ionisants. Crédit : Julia Fraud. CC BY-NC-ND.

Résumé

Le tableau 2.4 et la figure 2.7 résument les différentes façons d'absorber des particules selon leur nature et celle du matériau absorbant. Ainsi, si on veut se protéger des neutrons, il faut utiliser des matériaux de faible masse atomique comme le béton, l'eau, la paraffine. Et au contraire, si on veut se protéger des γ , il faudra plutôt utiliser des matériaux denses, comme le plomb. Les particules chargées sont beaucoup moins pénétrantes, on peut donc s'en protéger plus facilement.

2.2.2 Effet des rayonnements ionisants sur la matière

Nous avons vu jusque-là comment on pouvait freiner, arrêter ou absorber des rayonnements avec différents types de matériaux, selon la nature du rayonnement. Voyons maintenant quel est l'effet de ces rayonnements qui pénètrent dans la matière sur celle-ci, et en particulier dans le cas de la matière vivante et de l'être humain.

De manière générale, on peut résumer les effets des rayonnements sur la matière de la façon suivante :

- Dans les gaz : on va avoir ionisation du gaz le long de la trajectoire des particules.
- Dans les liquides : on va généralement avoir ionisation puis induction de réactions chimiques avec recombinaison entre et/ou formation de radicaux ¹³.
- Dans les solides : on va avoir des perturbations cristallines (défauts, discontinuités dans l'ordre cristallin...).

2.2.3 Effet des rayonnements ionisants sur la matière vivante et radioprotection

On distingue :

- L'exposition **externe** lorsque la source radioactive se trouve à l'extérieur de l'organisme, sur la peau ou les vêtements. Elle peut être éliminée par déshabillage et par une douche.
- l'exposition **interne** lorsque la source radioactive se retrouve dans l'organisme par *inhalation*, *ingestion*, ou qu'elle franchit la barrière cutanée lors d'une contamination d'une blessure ou plaie.
- L'**irradiation** est la pénétration d'un rayonnement à l'intérieur de la matière, inerte ou vivante (et donc accompagnée d'un dépôt d'énergie). On parle d'irradiation chronique si celle-ci est continue dans le temps (comme celle provenant des rayons cosmiques) ou ponctuelle (comme lors d'un examen radiologique).
- La **contamination** (radioactive) a lieu quand une substance radioactive se dépose sur un support (inerte ou vivant). On parle de contamination *chronique*, si celle-ci est continue dans le temps (comme l'inhalation du radon contenu dans l'air) ou *ponctuelle* (comme l'ingestion d'eau contaminée).

Si la source radioactive se trouve à l'extérieur du corps des personnes exposées, il suffit de les éloigner (la quantité d'énergie reçue décroît comme le carré de la distance pour une source isotrope, selon l'angle solide de la personne exposée) ou d'écranter la source pour stopper l'exposition.

Si la source est interne, on peut essayer d'utiliser des capteurs chimiques pour fixer les éléments radioactifs et les éliminer par les voies naturelles.

Les effets entre exposition externe et interne sont différents selon la nature du rayonnement. Le rayonnement α a un parcours d'environ 40 μm dans les tissus humains : sur la peau, c'est l'épaisseur de la « peau morte » ; dans le corps, il atteint directement les tissus vivants et l'irradiation peut être importante. Le rayonnement β , comme les rayons X de faible énergie, ont

13. Un radical ou radical libre est une espèce chimique avec un ou plusieurs électrons non appariés sur la couche externe ce qui en fait une espèce très instable et très réactive chimiquement.

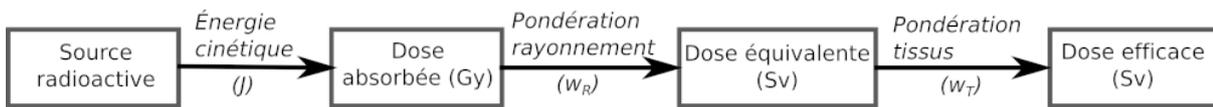


FIGURE 2.8 – Illustration des différentes notions de dose radioactives.

un pouvoir pénétrant plus important et peuvent ainsi irradier fortement la peau. Les photons X énergétiques et γ , comme les neutrons, vont traverser le corps et irradier en profondeur.

Les dégâts des rayonnements ionisants sur la matière vivante vont de la création de radicaux libres au sein de la cellule qui conduira à une altération des bases nucléiques de l'ADN (faible irradiation) à la destruction des cellules (irradiation intense). Le patrimoine génétique de la cellule peut ainsi être modifié et conduire à des cancers.

Notion de doses radioactives

On quantifie les effets des radiations sur les êtres humains à l'aide de la notion de dose. Il y a plusieurs subtilités dans cette notion (voir la figure 2.8).

Tout d'abord, on parle de **dose absorbée**, D , qui est la quantité moyenne d'énergie \bar{E} absorbée par unité de masse dm de matière irradiée :

$$D = \frac{d\bar{E}}{dm} \quad (2.8)$$

Elle s'exprime en *gray* (Gy) : $1 \text{ Gy} = 1 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$. C'est une dose *physique* qui ne tient pas compte de la nature inerte ou vivante de la matière exposée.

Il y a également le **débit de dose** qui est la dose de radiation absorbée par unité de temps (s'exprime en gray par seconde).

La notion de *dose absorbée* ne tient pas compte des effets biologiques.

Pour tenir compte des effets des rayonnements sur la matière vivante (le corps humain), on introduit les notions de *dose équivalente* et de *dose efficace*.

Pour cela, la dose absorbée (physique) est transposée en une *dose absorbée moyenne* $D_{T,R}$ dans le volume d'un organe ou d'un tissu T due à un rayonnement de type R (Nénot 2009).

On définit ainsi :

→ La **dose équivalente** dans un tissu ou un organe H_T par :

$$H_T = \sum_R w_R D_{T,R} \quad (2.9)$$

où w_R est le facteur de pondération (sans unité) pour le rayonnement R . La somme est calculée pour l'ensemble des rayonnements impliqués. Le tableau 2.5 et la figure 2.9 donnent les valeurs de w_R pour différents rayonnements.

→ La **dose efficace** D_{eff} est la somme pondérée des doses équivalentes reçues par les tissus :

$$D_{\text{eff}} = \sum_T w_T H_T = \sum_T w_T \sum_R w_R D_{T,R} \quad (2.10)$$

où w_T est le facteur de pondération (sans unité) pour l'organe ou le tissu T . On a : $0 < w_T < 1$ et $\sum_T w_T = 1$. Le facteur w_T est donné au tableau 2.6.

Les valeurs des facteurs de pondération sont déterminées empiriquement (Nénot 2009).

La dose équivalente ne concerne donc qu'un tissu ou organe T , la dose efficace concerne le corps entier. Elles s'expriment toutes les deux en sievert (Sv), sachant que physiquement on a : $1 \text{ Sv} = 1 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$, moyennant les facteurs de pondération exprimés ci-dessus, sans unités.

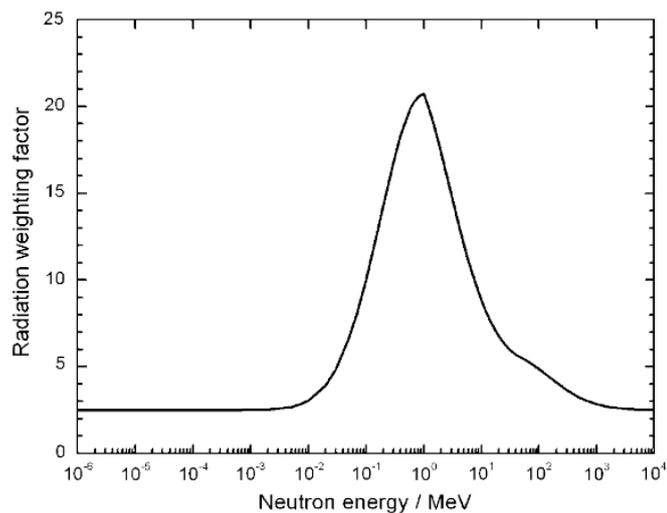


FIGURE 2.9 – Facteur de pondération w_R pour un rayonnement de neutrons en fonction de l'énergie des neutrons. Source : ICRP (2017). © ICRP.

Nature du rayonnement	Facteur de pondération (w_R)
Photons	1
Électrons et muons	1
Protons	2
Particules α , fragments de fission	20
Neutrons	fonction continue

TABLE 2.5 – Facteur de pondération w_R lié à la nature du rayonnement permettant d'obtenir la dose équivalente à partir de la dose absorbée. Il est sans unité. Pour les neutrons, voir la figure 2.9. D'après Nénot (2009).

Tissu	Facteur de pondération tissulaire (w_T)
gonades	0,20
moelle osseuse	0,12
colon	0,12
poumons	0,12
estomac	0,12
vessie	0,05
seins	0,05
foie	0,05
œsophage	0,05
thyroïde	0,05
peau	0,01
surface osseuse	0,01
reste	0,05
TOTAL	1,00

TABLE 2.6 – Facteur de pondération lié à la nature du tissu touché (w_T) permettant d'obtenir la dose efficace à partir de la dose équivalente. Il est sans unité, et la somme de tous les facteurs doit faire 1. D'après Foos (2009).

Radionucléide	Mode d'incorporation	Facteur de dose (en mSv · kBq ⁻¹)	
		3 mois	adulte
Iode 131	Ingestion	0,48	0,022
Césium 137		0,011	0,013
Uranium 238		0,14	0,045
Iode 131	Inhalation	0,072	0,0074
Césium 137		0,0088	0,0046
Uranium 238		1,9	0,5

TABLE 2.7 – Extrait d'un tableau de facteurs de dose pour les membres du public (jeune enfant et adulte) pour quelques radionucléides, d'après Eckerman *et al.* (2012), tableaux F.1 et G.1.

Le sievert

Le sievert sert à quantifier le risque stochastique induit sur la santé des sujets par de faibles rayonnements : risque supplémentaire de décéder un jour d'un cancer, risque de transmettre un jour une mutation grave à un descendant. On peut utiliser le sievert pour exprimer de faibles expositions, par exemple pour la radioprotection des travailleurs et du public dans des conditions normales. (Source : Wikipédia)

La notion de dose équivalente ou de dose efficace n'est pas valable pour les fortes doses ($\geq 0,25$ Gy ; $\geq 0,25$ Sv) car alors des effets *déterministes* (effets de seuil) apparaissent de manière certaine sur les tissus.

Pour les faibles irradiations, les risques sont *stochastiques* : les effets n'apparaissent pas de manière certaine.

Le gray et le sievert sont deux unités « homogènes » que l'on peut néanmoins difficilement comparer, à cause des facteurs de pondération sans dimension w_R et w_T qui interviennent dans la définition des doses équivalente et efficace qui, elles, s'expriment en sieverts. Le tableau 2.5 montre effectivement qu'un gray de particules α est ~ 20 fois plus cancérigène qu'un gray de photons ou d'électrons.

Facteur de dose : du becquerel au sievert

On peut se demander comment on « passe » d'une activité (en becquerels) à une dose efficace reçue (en sieverts). On définit ainsi un *facteur de dose* qui s'exprime en Sv · Bq⁻¹, comme la dose efficace (en Sv) correspondant à l'ingestion ou l'inhalation de 1 Bq d'un radionucléide donné. Le facteur de dose ne concerne ainsi que les expositions internes. On ne peut pas évaluer d'expositions externes à l'aide de ces facteurs.

Le facteur de dose est calculé à l'aide de simulations prenant en compte un grand nombre de facteurs : biocinétique (absorption, rétention, distribution, excrétion des radionucléides dans un organisme vivant), type de radionucléide, voie d'incorporation (répartition dans les organes), période, etc. On distingue dans ces calculs l'exposition externe¹⁴ et l'exposition interne¹⁵.

Le tableau 2.7, qui donne quelques exemples de facteurs de dose, montre qu'un adulte reçoit une dose de 1 mSv s'il inhale, par exemple, 135 000 Bq d'iode 131 (β^-) ou 2000 Bq d'uranium 238 (α).

14. Dans l'exposition externe, la dose reçue dépend de très nombreux paramètres (caractéristiques de la source, position de l'individu, écrans de protection...).

15. Dans l'exposition interne, on a une relation complexe entre l'activité et la dose efficace qui dépend du radionucléide (physico-chimie + type de rayonnement émis), du mode d'incorporation (ingestion ou inhalation) et de l'âge de l'individu.

2.2.4 Effet de la dose reçue

Les effets produits d'une dose radioactive reçue peuvent être ¹⁶ :

- stochastiques (aléatoires) pour des faibles doses d'irradiation et dans le cas où la cellule a réussi à se réparer mais de manière incomplète, entraînant ainsi des modifications de sa fonction;
- déterministes pour des doses plus fortes, entraînant la mort de la cellule à plus ou moins court terme.

La limite entre effets stochastiques et effets déterministes se trouve autour de 100 mSv. Au-delà, les études, en particulier le suivi de dizaines de milliers de survivants des bombardements d'Hiroshima et Nagasaki ont montré que le risque de cancers augmente. En deçà, les études n'ont pas établi de façon indiscutable l'existence d'une relation entre dose de rayonnements et risque de cancers ou maladies non cancéreuses notamment en raison des incertitudes qui accompagnent ce type d'étude. Une étude récente (David *et al.* 2021) semble montrer (ceci restant à confirmer) qu'une exposition à un rayonnement de fond (naturel) plus élevé aurait des effets bénéfiques sur la santé (en termes de longévité et de réduction de risque de cancer).

C'est pourquoi cette valeur de 100 mSv a été choisie pour définir schématiquement le domaine des « faibles doses » ¹⁷.

Les études actuelles sur les « faibles » doses ne permettent pas d'exclure ni d'affirmer l'existence de risques pour les êtres vivants. Des recherches sont en cours, mais il est difficile d'attribuer les causes d'un cancer à telle ou telle exposition (radioactivité, génétique, environnement, etc.) de manière certaine. Cela nécessite des études longues avec un grand nombre de sujets pour avoir une réalité statistique. Il est clair que l'extrapolation des effets des fortes doses ne reflète pas du tout la réalité.

La limite réglementaire (en vertu du principe de précaution) pour la population de la dose annuelle admissible d'expositions d'origine artificielle (sauf celle reçue à des fins médicales) est fixée à 1 mSv par Commission internationale de protection radiologique (CIPR). Ce seuil a été fixé de manière à gérer les risques avec un coût acceptable. Pour les travailleurs, le seuil maximal recommandé est de 20 mSv par an.

Les effets déterministes d'une forte dose sont les suivants ¹⁸ :

- 1 Sv = nausées, vomissements, perte de cheveux,
- 3 à 5 Sv = hémorragie et infection, apparition d'érythème sur la peau, stérilité permanente des ovaires (testicules > 5 Sv),
- 5 Sv = dose létale pour 50 % des personnes exposées,
- 10 Sv = dose létale pour 100 % des personnes exposées (en quelques jours),
- 30 Sv = mort en quelques heures.

Le tableau 2.8 donne les valeurs de l'activité pour quelques substances courantes. Le tableau 2.9 donne quelques valeurs de la dose équivalente reçue dans différentes circonstances. Le tableau 2.10 donne quelques valeurs de doses ponctuelles reçues pour certains examens médicaux.

16. Source : <https://fr.wikipedia.org/wiki/Radioprotection>.

17. Tiré du site de l'IRSN : <https://www.irsn.fr/FR/connaissances/Sante/rayonnements-ionisants-effets-radioprotection-sante/effets-sanitaires-faibles-doses/Pages/1-comprendre-faibles-doses-rayonnements-ionisants.aspx#.Y-DQLi-ZO3A>.

18. https://fr.wikipedia.org/wiki/échelles_et_effets_de_doses_de_radiation.

Eau de mer	13 Bq/L
Poisson	100 Bq/kg
Corps humain	100 Bq/kg
Pomme de terre	150 Bq/kg
Sol sédimentaire	400 Bq/kg
Café	1000 Bq/kg
Cendre de charbon	2000 Bq/kg
Engrais phosphatés	5000 Bq/kg
Sol granitique	8000 Bq/kg
Combustible usé en sortie de réacteur nucléaire	10^{14} Bq/kg

TABLE 2.8 – Valeurs de l'activité pour quelques substances.

Radioactivité naturelle annuelle en France (moyenne)	2,3 mSv
Passager d'un vol Paris-New-York	0,03 mSv
Un jour en station orbitale à 400 km d'altitude	1 mSv
Mission de 9 jours sur la Lune (Apollo 14)	11 mSv
Une cigarette	5 à 10 μ Sv

TABLE 2.9 – Quelques exemples de doses équivalentes.

Panoramique dentaire	0,01 mSv
Radiographie des poumons	0,1 mSv
Mammographie	1,0 mSv
Rachis lombaire	1,5 mSv
Scintigraphie thyroïdienne	0,24 mSv
Scanner abdominal	10 mSv
Examen TEP-scanner corps entier	20 mSv

TABLE 2.10 – Quelques exemples de doses ponctuelles reçues lors de certains examens médicaux (ordres de grandeur).

La figure 2.10 montre la dose équivalente annuelle moyenne à laquelle un individu, en France, est exposé. Cette dose, d'environ 4,5 mSv se décompose en 2,3 mSv d'origine naturelle¹⁹ et 2,2 mSv d'origine artificielle²⁰.

Dose ponctuelle ou dose étalée dans le temps? Chaque année, nous recevons, en France, en moyenne 2,3 mSv rien que par la radioactivité naturelle. À 43 ans, on atteint un cumul d'environ 100 mSv.

On sait peu de choses sur la « Remise à Zéro » : au bout de combien de temps peut-on remettre le compteur à zéro? Le peut-on seulement? La réponse dépend de nombreux facteurs

19. Le radon est un gaz émanant surtout des roches granitiques et volcaniques; tous ses isotopes sont radioactifs, leurs périodes vont de quelques heures à quelques jours. Il est produit par la désintégration de l'uranium 238; en France, en moyenne, on a ~ 90 Bq/m³, tandis qu'en Bretagne, on a : ~ 120 Bq/m³.

Le rayonnement provenant du sol, provient en particulier des sols granitiques.

Le rayonnement cosmique est provoqué par les particules énergétiques qui proviennent du Soleil ou du cosmos et qui viennent heurter les molécules de l'atmosphère créant ainsi des nucléides radioactifs, comme le carbone 14.

20. Voir *L'exposition à la radioactivité en France*, IRSN, 2016, http://www.irsn.fr/FR/connaissances/Sante/exposition-population/exposition-population-france-metropole/Documents/IRSN_Infographie-Exposition-population_201609.pdf.

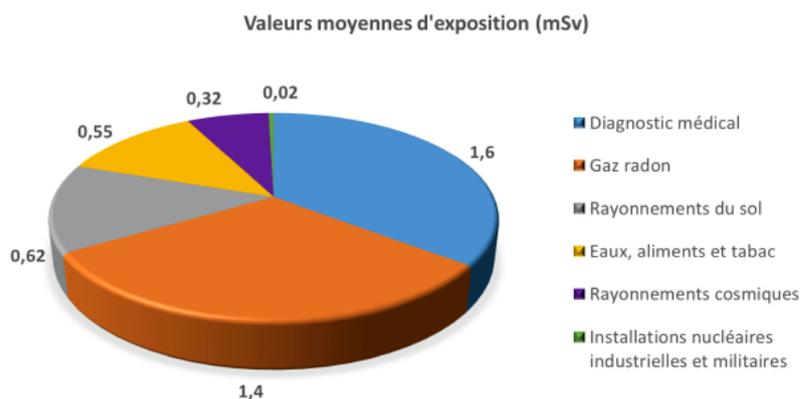


FIGURE 2.10 – Dose équivalente annuelle moyenne en France. Données : IRSN 2016.

(dose ponctuelle, autres facteurs biologiques, chimiques...) ²¹ ! Néanmoins, une dose reçue d'un seul coup est plus nocive que si elle est reçue étalée sur une longue période.

2.3 Application des rayonnements

Les applications de la radioactivité sont vastes et souvent méconnues ; elles sont pourtant à la pointe de la recherche, de la médecine, de l'industrie et de l'innovation.

L'utilisation de radioéléments est étroitement liée à leur production. On peut produire des isotopes radioactifs de différentes manières :

- irradiation neutronique d'isotopes stables dans des réacteurs nucléaires de recherche ou de puissance (cobalt 60 ou iridium 192 de période longue) ;
- séparation chimique des produits de fission issus des réacteurs de puissance (césium 137, strontium 90, krypton 85 ou iode 131) ;
- irradiation d'isotopes stables par des particules chargées d'énergie élevée (α , deutons, protons, ions lourds, etc.) dans des cyclotrons (éléments de courte période comme le carbone 11, l'oxygène 15, le fluor 18 ou l'azote 13).

Selon l'utilisation que l'on veut en faire, le type de rayonnement que l'on souhaite, la durée de vie, etc., on peut produire différents radioéléments. Dans la suite, on présente quelques applications en recherche scientifique ou industrielle de l'utilisation de la radioactivité.

Analyse par activation

L'analyse par activation consiste à bombarder un échantillon avec un rayonnement approprié (neutrons, protons, α , deutons ou γ , voir la figure 2.11). Le matériau bombardé est alors « excité » : les noyaux le constituant vont se désexciter en émettant un rayonnement, le plus souvent un rayonnement γ . On mesure le spectre (voir figure 2.12) de ces radiations émises, ce qui permet l'identification des noyaux sources et leur dosage. Cette méthode d'investigation est non destructrice, sachant que les détecteurs actuels permettent de déceler la désintégration de quelques noyaux seulement.

Elle permet également de réaliser des dosages ou d'identifier des composés en faible quantité.

21. Voir, par exemple : <http://www.laradioactivite.com/site/pages/cumuldesdoses.htm>.

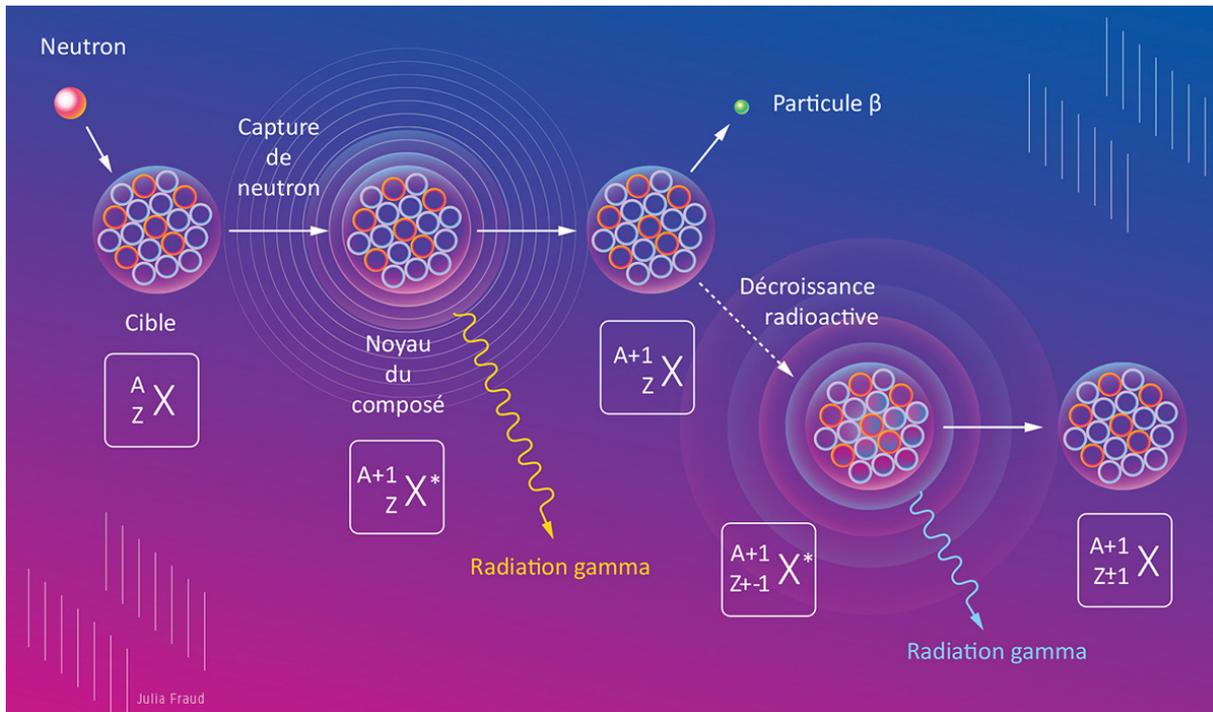


FIGURE 2.11 – Illustration d’une chaîne de réactions possible pour l’analyse d’une cible par activation neutronique. Ce sont les photons γ émis (PGAA = *Prompt Gamma Activation Analysis*; NAA = *Neutron Activation Analysis*) qui sont mesurés comme à la figure 2.12. Crédit : Julia Fraud. CC BY-NC-ND.

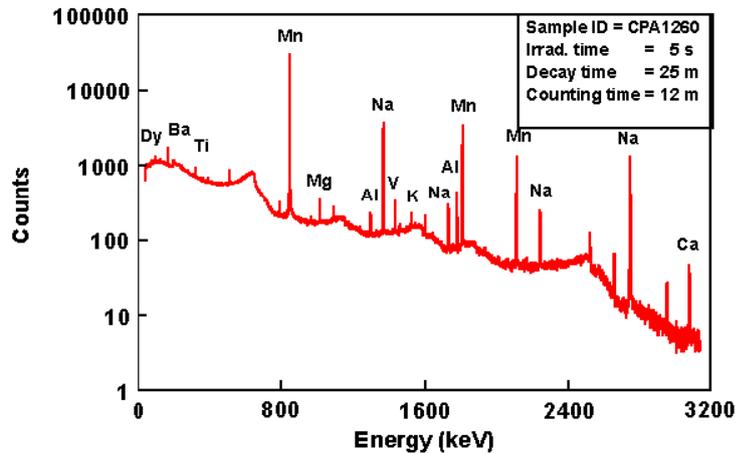
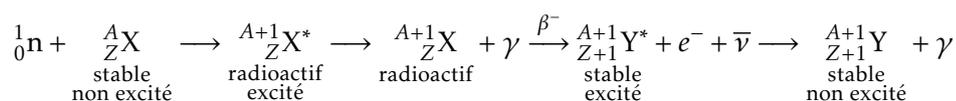


FIGURE 2.12 – Spectre γ montrant différents éléments à courtes périodes mesurés dans un échantillon de poterie irradié pendant 5 secondes, qui a décré pendant 25 minutes et dont on a compté les photons pendant 12 minutes avec un détecteur HPGe (germanium hyperpur). Source : https://archaeometry.missouri.edu/naa_technical.html. © University of Missouri.

Exemples d’utilisation de l’analyse par activation :

- analyse de micro-météorites, d’œuvres d’art...
- industrie chimique : détection d’impuretés (fabrication de corps très purs),
- biologie : dosage des oligo-éléments,
- dosage des composants des alliages en métallurgie,
- dosage des dopants dans les semi-conducteurs,
- etc.

Un exemple consiste à bombarder une cible avec des neutrons selon la réaction suivante :



Cette chaîne de réactions est schématisée à la figure 2.11.

Analyse par traceurs

L'analyse par traceurs consiste à ajouter dans une solution une quantité donnée d'isotopes radioactifs, et d'attendre que ces éléments se diluent et soient répartis de manière homogène dans tout le volume du liquide. On prélève alors un échantillon de fluide et on mesure son activité. Cela permet des mesures de masses, de volumes, de concentrations.

On peut ainsi suivre l'évolution et le comportement de composés impliqués dans des réactions ou processus physiques, chimiques, métaboliques...

Par exemple, on peut doser l'insuline dans le sang en la marquant avec de l'iode 125 ; on peut mesurer le volume sanguin.

Médecine nucléaire – radiothérapie

Les premières applications de la radioactivité datent de 1903, elles utilisaient la désintégration du radium 226, fraîchement découvert, pour traiter les tumeurs cancéreuses.

Le traitement des affections cancéreuses se fait en utilisant l'effet de destruction cellulaire sélective par certains rayonnements : irradiation externe avec une source ponctuelle ou un accélérateur ; irradiation interne directement au voisinage de l'organe atteint ; et d'autres techniques spécifiques.

En France, près de 50 % des cancers ont été traités au moyen de ces techniques nucléaires en 2016²². Environ 40 % des cancers guéris le sont grâce aux effets thérapeutiques des radioéléments²³.

Médecine nucléaire – diagnostic in vivo

On peut également utiliser la radioactivité en médecine nucléaire non pour traiter mais pour diagnostiquer.

Le principe de la scintigraphie (figure 2.13) est de détecter des radiotraceurs spécifiques préalablement injectés dans l'organisme humain qui vont se fixer sur les organes à examiner sans perturber les processus métaboliques. On peut ensuite visualiser le fonctionnement de l'organe à traiter (ou à étudier) en suivant le trajet du radioélément dans le corps (thyroïde avec l'iode, os avec le technétium 99m²⁴ qui a la propriété de s'y fixer, etc.).

22. Voir : Institut National du Cancer - La radiothérapie. <http://lesdonnees.e-cancer.fr/Themes/Soins/La-radiotherapie>.

23. *La radiothérapie guérit 40 % des cancers*, Le Figaro, 8 octobre 2015, <http://www.lefigaro.fr/flash-actu/2015/10/08/97001-20151008FILWWW00204-la-radiotherapie-guerit-40-des-cancers.php>.

24. Le technétium 99m est un isomère nucléaire du technétium 99, c'est-à-dire un noyau dans un état d'énergie d'excitation particulier. Il se désexcite en émettant un photon γ avec une période de 6 h pour donner du technétium 99, qui a lui, une période de 211 000 ans.

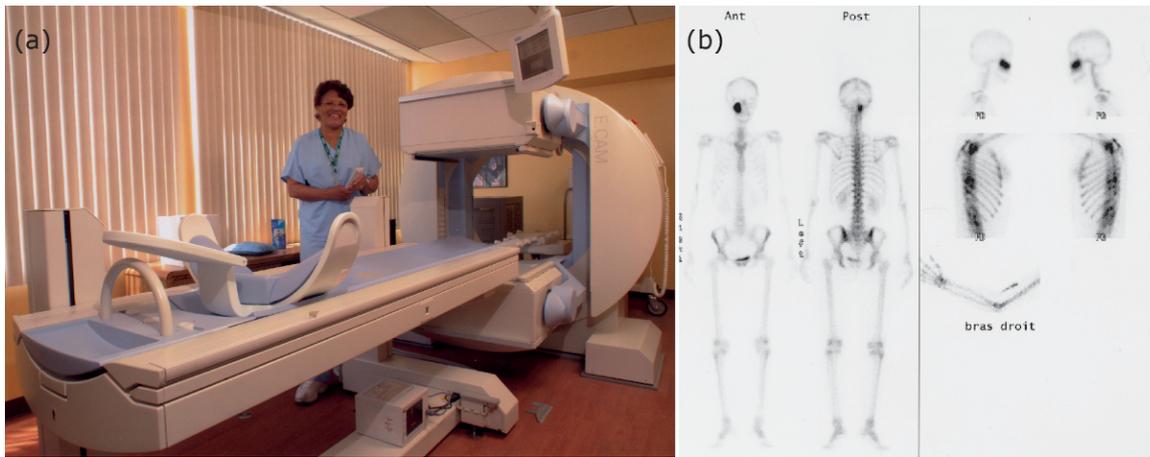
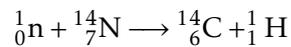


FIGURE 2.13 – Scintigraphie. (a) Gamma caméra à scintigraphie. Cet appareil fait l'imagerie des photons γ . Source : Wikipédia/Brendaïcm. CC BY-SA. (b) Résultat d'une scintigraphie osseuse : on injecte au patient du technicium 99m qui est radioactif γ et qui a la particularité de se fixer sur les os. L'image de ce patient montre l'intensité de l'émission γ que les médecins interprètent comme des métastases osseuses. CC0.

Datation (carbone 14)

Les rayons cosmiques (essentiellement des protons ainsi que quelques α , électrons, γ , neutrinos...) viennent heurter les molécules de la haute atmosphère ce qui engendre un flux de neutrons qui va, entre autres, rencontrer des noyaux d'azote, principal composant de l'atmosphère :



On obtient ainsi du ${}^{14}_6\text{C}$ qui est radioactif (tandis que les isotopes ${}^{13}_6\text{C}$ et ${}^{12}_6\text{C}$ sont stables). Les êtres vivants échangent en permanence du carbone avec leur environnement (photosynthèse, métabolisme...), donc la proportion de ${}^{14}\text{C}$ qu'ils contiennent est la même que celle observée dans l'atmosphère.

Lorsqu'un organisme meurt, il cesse d'absorber du ${}^{14}\text{C}$. Donc celui-ci décroît radioactive-ment. La mesure de son activité à un instant ultérieur permet ainsi de dater l'instant de sa mort.

La période du ${}^{14}\text{C}$ est de 5730 ans. Ce procédé permet donc de dater les événements relativement récents en archéologie ou géologie (jusqu'à $\sim 50\,000$ ans). Il a été mis au point par Libby (1946), à qui il a valu de recevoir le prix Nobel de chimie en 1960.

D'autres nucléides sont utilisés pour dater d'autres époques des temps géologiques : par exemple le thorium 232 (émetteur α de période 14 milliards d'années) ou le potassium 40 (émetteur β^- de période égale à 1,3 milliard d'années).

Traceurs en sciences de l'environnement

On peut également utiliser les radionucléides présents naturellement (fossiles ou produits présents en permanence dans l'atmosphère), ou les radionucléides artificiels rejetés par les essais nucléaires ou l'industrie nucléaire pour mesurer différents flux en sciences de l'environnement (voir par exemple la figure 2.14). Ou bien, injecter volontairement des radionucléides dans le milieu.

Les principales applications sont :

- l'hydrologie souterraine (évaluation des réserves d'eau, contrôle des nappes aquifères, etc.);

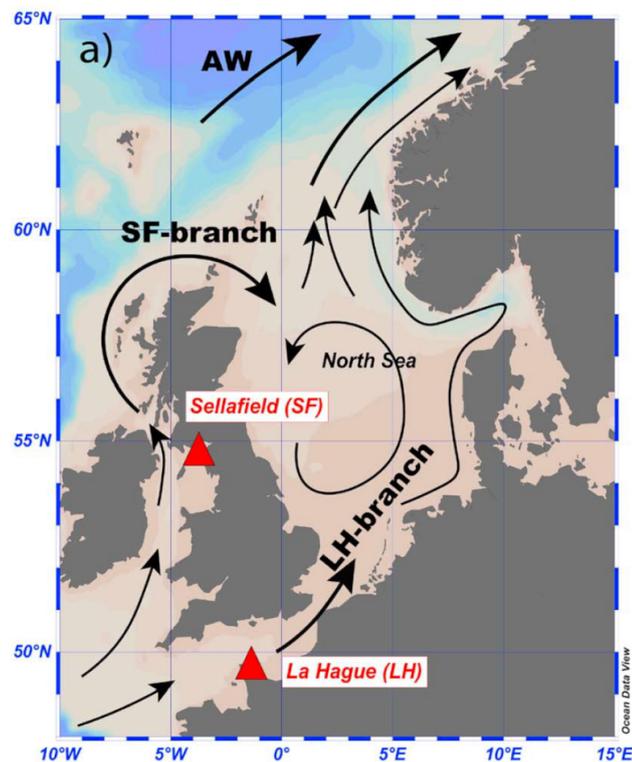


FIGURE 2.14 – Carte montrant l’emplacement des deux usines européennes de retraitement de Sellafield (SF) et de La Hague (LH) rejetant de l’iode 129 et de l’uranium 236 servant de traceurs pour les courants qui sont représentés schématiquement dans la mer du Nord. Tiré de Casacuberta *et al.* (2018). © American Geophysical Union.

- l’hydrologie de surface (mesure de débits, contrôle de la dispersion des polluants, détection de fuite sur les barrages, étude des courants marins à l’aide, par exemple, des rejets de La Hague...);
- la sédimentologie dynamique (mesure des déplacements des sédiments, opérations de curage et dragage, charriage sous-marin, etc.).

Applications industrielles

- **Contrôle non destructif par gammagraphie** (émetteurs γ , iridium 192 et cobalt 60) – même principe que la radiographie X, mais pour des matériaux denses : contrôle de corrosion, d’entartrage, d’intégrité, d’homogénéité, de remplissage, de positionnement, d’assemblage, de qualité de divers matériaux (fonte, bétons...). Voir les figures 2.15 et 2.16.
- **Contrôle non destructif** : avec des **électrons** pour les matériaux en feuilles minces comme le papier, les billets de banque, les manuscrits anciens, ou les matières plastiques ; avec des **neutrons** pour les matériaux légers hydrogénés (caoutchouc, explosifs, matières plastiques, colles...).
- **Jauges radiométriques** : mesures de niveaux (sans contact), contrôle de remplissage automatique (pots de yaourt, paquets de lessive, briquets, bouteilles de gaz...) ou de vidange de réservoir (sable, ciments, minerais...), mesures d’épaisseur, de densité, de distance, d’humidité, de concentration, etc.
- **Traceurs industriels** : visualisation des flux avec des applications très vastes.
- **Sources lumineuses** : cadrans lumineux, signaux lumineux des issues de secours (tritium).



FIGURE 2.15 – Vue générale du chantier montrant le tir réalisé sur le bras gauche de la statue personnifiant la vertu cardinale de la *Prudence*, sur le monument funéraire d’Henri II et de Catherine de Médicis à la basilique Saint Denis. Source : Castelle (2016). © Manon Castelle.

- **Sources d’énergie** : sondes spatiales (générateur thermoélectrique à radioisotope ²⁵), stations météo isolées, installations sous-marines...
- **Radiotraitement chimique** : modification des propriétés ou des caractéristiques de certains matériaux issus de l’industrie chimique (dopage du silicium pour la microélectronique, par exemple).
- **Conservation des œuvres d’art** : destruction des microorganismes qui dégradent les œuvres (comme, par exemple, les champignons qui infestaient la momie de Ramsès II traitée par le CEA en 1976).
- **Traitement des eaux usées.**
- **Stérilisation et décontamination microbiologique** : matériel médico-chirurgical, emballages, liquides, produits pulvérulents, etc.
- **Amélioration des espèces végétales** : radiomutagenèse, phénomène mis en évidence en 1927.
- **Éradication d’espèces nuisibles** : radiostérilisation d’individus mâles (préserve l’environnement par rapport à l’usage classique d’insecticides ; inconvénient : coût).
- **Traitement des denrées agro-alimentaires** : allongement de leur durée de conservation, assainissement, réduction des pertes des récoltes stockées.

25. Un générateur thermoélectrique à radioisotope est un système permettant de produire de l’énergie électrique à partir de la production de chaleur dégagée par la radioactivité d’un radioélément (comme le plutonium). Pour ce faire il utilise un dispositif à semiconducteur (couples thermoélectriques) utilisant l’effet Seebeck pour convertir la chaleur en électricité. Ce type de système est utilisé dans les sondes spatiales comme celle qui a exploré Saturne, Cassini-Huyghens.



FIGURE 2.16 – Radiographie gamma de la partie droite du buste et de la main gauche de la statue de la *Prudence* (voir figure 2.15). L'épaisseur de la paroi métallique varie de 8 à 18 mm dans le bras et de 25 à 40 mm dans la tête. Source : Castelle (2016). © C2RMF.

2.4 Production d'énergie nucléaire

2.4.1 Énergie chimique et énergie nucléaire

L'essence produit de l'énergie par réaction chimique :



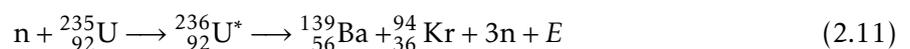
1 kg d'essence fournit 50 MJ d'énergie.

L'uranium produit de l'énergie par fission en récupérant l'énergie de liaison des noyaux. 1 kg d'uranium naturel enrichi (combustible des centrales) fournit 0,05 g d'énergie, soit 5000 GJ... 1 kg d'uranium fournit ainsi 10^5 fois plus d'énergie qu'1 kg d'essence !

2.4.2 Réaction de fission

La fission induite consiste à fragmenter un noyau lourd en plusieurs morceaux (souvent deux) à l'aide d'un neutron.

Par exemple (parmi différentes possibilités), on a la réaction :



où E est l'énergie libérée et U^* est un noyau d'uranium excité, c'est-à-dire dans un niveau d'énergie non fondamental.

L'énergie de liaison est l'énergie qu'il faut fournir au noyau pour en séparer tous les nucléons. Les noyaux lourds sont moins liés que les noyaux plus légers (voir figure 2.1) : un noyau lourd qui se casse en deux (fission) libère une partie de son énergie de liaison.

Avec les énergies de liaison par nucléon pour les différents noyaux impliqués dans la réaction de fission ci-dessus, on a :

$$E \simeq 139 \times 8,3 + 94 \times 8,8 - 235 \times 7,6 \simeq 195 \text{ MeV} \quad (2.12)$$

Les neutrons emportent chacun environ 2 MeV d'énergie cinétique (tandis qu'une réaction chimique délivrera une énergie de l'ordre de l'électronvolt par molécule). Le reste (~ 189 MeV) se retrouve dans l'énergie cinétique des fragments.

2.4.3 Fissile ou fertile ?

Un **noyau fissile** est un noyau qui peut subir une fission nucléaire sous l'effet de neutrons (lents ou rapides). Le seul noyau fissile existant à l'état naturel est l'*uranium 235* ; tous les autres sont produits artificiellement.

Un **noyau fertile** est un noyau qui peut produire un isotope fissile par capture d'un neutron, directement ou après une décroissance β . Les deux seuls isotopes fertiles présents dans la nature sont l'*uranium 238* (qui donne de l'*uranium 239*, instable, puis du *plutonium 239*, fissile) et le *thorium 232* (qui donne du *thorium 233*, instable, puis de l'*uranium 233*, fissile).

L'*uranium* naturel contient (en masse) 99,3 % d'*uranium 238* (fertile) et seulement 0,7 % d'*uranium 235* (fissile). La période de l'*uranium 235* étant de 710 millions d'années, et celle de l'*uranium 238* de 4,5 milliards d'années, la proportion d'*uranium 235* dans l'*uranium* naturel varie au cours du temps : lors de la formation du système solaire, il y a 4,6 milliards d'années, elle était de 14 %.

2.4.4 Réaction en chaîne

La capture d'un neutron par un noyau lourd peut donc donner une fission. Mais le noyau peut aussi se désexciter en émettant des γ (capture radiative). Ce processus concurrence la fission, comme par exemple la réaction :



Pour savoir quel est le régime énergétique des neutrons incidents donnant une fission, on parle de probabilité de réaction ou encore de *section efficace*. On la note généralement σ ; la section efficace d'une réaction nucléaire s'exprime en barn avec $1 \text{ b} = 10^{-28} \text{ m}^2$.

On définit également le nombre η de neutrons de fission qui pourront être disponibles pour provoquer une nouvelle réaction. Si $\eta > 1$, alors il pourra y avoir réaction en chaîne, c'est-à-dire qu'une réaction initiale va générer des neutrons qui vont eux-mêmes permettre la fission de nouveaux noyaux.

Les neutrons produits par une réaction de fission telle que la réaction (2.11) ont une énergie de l'ordre de 2 MeV. Ils sont dits « rapides ». Or le tableau 2.11 montre que la section efficace de réaction de fission de l'*uranium 235* avec des neutrons rapides est peu élevée (1,3 barn) d'une part, et que la section efficace de capture de ces neutrons rapides par l'*uranium 238* est du même ordre de grandeur (2,4 barns). Comme l'*uranium* naturel contient 140 fois plus d'*uranium 238*, un neutron sera principalement capturé par l'*uranium 238* et ne servira donc pas à la fission. En revanche, à basse énergie le rapport des sections efficaces : $\sigma_f(235)/\sigma_\gamma(238)$ vaut environ 215 ce qui devient plus favorable pour la fission en compensant la faible proportion d'*uranium 235*.

Il est donc préférable de ralentir les neutrons produits par la fission, afin qu'ils deviennent « thermiques » pour maximiser leurs chances de produire de nouvelles fissions et induire ainsi une réaction en chaîne.

Néanmoins, même aux énergies thermiques, la réaction de fission de l'*uranium 235* est toujours un peu en compétition avec la capture radiative²⁶. Pour l'*uranium* naturel, le nombre

26. La capture radiative est la capture d'un neutron par le noyau, suivie de l'émission d'un photon γ .

	σ_f (barn)	σ_γ (barn)	ν	η
Neutrons thermiques ($E \sim 0,025$ eV)				
$^{235}_{92}\text{U}$	582	108	2,5	2,1
$^{238}_{92}\text{U}$	0	2,7	0	0
$^{239}_{94}\text{Pu}$	750	300	2,9	2,1
Neutrons rapides ($E \sim 2$ MeV)				
$^{235}_{92}\text{U}$	1,3	0,10	2,5	2,3
$^{238}_{92}\text{U}$	0,5	2,4	2,9	0,5
$^{239}_{94}\text{Pu}$	2	0,1	2,9	2,7

TABLE 2.11 – Tableau donnant les sections efficaces des réactions de fission σ_f et de désexcitation par émission de γ (capture radiative), σ_γ , pour différents noyaux. On donne également les paramètres ν du nombre moyen de neutrons par fission et η le nombre de neutrons produits par neutron absorbé pour ces réactions. Données : Basdevant *et al.* (2002).

Noyau	Absorption thermique	Nombre de chocs
	σ_a relative	n
H	1	15
D	$1,5 \cdot 10^{-3}$	20
C	10^{-2}	92
O	$8,5 \cdot 10^{-4}$	121

TABLE 2.12 – Tableau donnant la probabilité d'absorption des neutrons σ_a et le nombre de chocs n pour thermaliser un neutron rapide, pour différents noyaux modérateurs.

η de neutrons « de fission » est de 1,36 pour une énergie thermique²⁷. Pour de l'uranium 235 pur, il serait de 2,1 (voir le tableau 2.11). Il faut donc enrichir l'uranium pour augmenter la proportion d'uranium 235. Avec un taux d'enrichissement de 3 %, le facteur η vaut 1,9, car la différence entre les rapports de sections efficaces de fission et de captures radiatives devient alors plus favorable pour une proportion d'uranium fissile plus grande.

Pour réduire l'énergie des neutrons émis par les réactions de fission, on utilise un matériau *modérateur*, qui va absorber le trop plein d'énergie des neutrons. Comme ceux-ci interagissent par chocs sur les noyaux, des noyaux légers sont nécessaires pour maximiser le transfert d'énergie (chocs élastiques) : par exemple de l'hydrogène, du deutérium ou du carbone.

Un bon modérateur est un matériau qui absorbe peu de neutrons (pour en laisser un maximum induire des réactions de fission) et qui les ralentit rapidement. Le tableau 2.12 montre que si l'hydrogène (H) ralentit les neutrons rapidement (en seulement 15 chocs), en revanche il a l'inconvénient de capturer parfois des neutrons pour former du deutérium.

27. Pour un mélange d'uranium 238 et d'uranium 235, le nombre η de neutrons produits par un neutron absorbé dans le combustible est donné par :

$$\eta = \nu \times \frac{N_{235}\sigma_f(235)}{N_{235}\sigma_f(235) + N_{235}\sigma_\gamma(235) + N_{238}\sigma_\gamma(238)}$$

où ν est le nombre moyen de neutrons émis par fission, soit 2,47; N_{235} et N_{238} sont les nombres de noyaux d'uranium 235 et 238 respectivement, par unité de volume; $\sigma_f(235)$ est la section efficace de fission pour l'uranium 235, $\sigma_\gamma(235)$ et $\sigma_\gamma(238)$ sont les sections efficaces de capture radiative de l'uranium 235 et 238.

2.4.5 Les principaux types de réacteurs

Compte tenu des données précédentes (en fonction notamment du combustible, du matériau modérateur et du fluide caloporteur), on peut imaginer différentes sortes de réacteurs pour récupérer l'énergie de la fission.

- Les **réacteurs à uranium naturel** fonctionnent avec des neutrons thermiques. Le modérateur ne peut être de l'eau car l'hydrogène capture trop facilement les neutrons, et l'uranium naturel contient trop peu d'uranium 235 fissile; le carbone a un pouvoir ralentisseur moins grand. L'eau lourde (D₂O) est le meilleur modérateur, mais présente un prix de revient élevé. Ce type de réacteur est désormais obsolète et en cours de démantèlement. En France, les réacteurs de technologie UNGG (uranium naturel graphite gaz) développés dans les années 1950 furent utilisés pour produire du plutonium militaire et de l'électricité. La technologie soviétique RBMK, impliquée dans l'accident de Tchernobyl en 1986 (et modifiée depuis), utilise de l'uranium légèrement enrichi et du graphite comme modérateur.
- Les **réacteurs à uranium enrichi**. L'uranium naturel contient 0,7 % de ²³⁵U; un enrichissement à 3 % permet d'utiliser le graphite (C) ou l'eau légère comme modérateur (filiale à eau pressurisée – REP – ou encore à eau bouillante – REB – comme les réacteurs de la centrale de Fukushima). Les réacteurs de 3^e génération, comme l'EPR (*Evolutionary Power Reactor*), s'appuient sur cette technologie; la différence vient d'une sécurité et d'une rentabilité économique accrues.
- Les **réacteurs à neutrons rapides** fonctionnent sans modérateur et utilisent le plutonium 239 qui engendre plus de neutrons réactifs avec des neutrons rapides (voir le tableau 2.11). Le plutonium est produit à partir de l'uranium 238. Si le combustible est mélangé avec de l'uranium naturel, les neutrons produits permettent ainsi de régénérer le combustible. Actuellement trois réacteurs de cette technologie sont en fonctionnement et produisent de l'électricité dans le monde – deux en Russie et un en Chine. Plusieurs expérimentations ont pris fin. Tous sont refroidis par du sodium liquide. En France, le réacteur *Phénix*, s'est arrêté en 2010 (après 36 années de fonctionnement), tout comme *Superphénix* en 1996, par décision politique.

Ces technologies datent des années 1950-1960. Des recherches sont effectuées sur de nouvelles technologies de production d'électricité nucléaire, il s'agit de la génération IV²⁸. Les objectifs sont d'améliorer la sûreté, de brûler les stocks de plutonium, de minimiser les déchets, d'économiser les ressources naturelles, de diminuer les coûts de construction et d'exploitation. La maturité technique est espérée à l'horizon 2030. Six concepts, parmi les plus prometteurs, sont retenus :

- réacteur nucléaire à très haute température;
- réacteur à eau supercritique;
- réacteur nucléaire à sels fondus (RSF);
- réacteur à neutrons rapides à caloporteur gaz;
- réacteur à neutrons rapides à caloporteur plomb;
- réacteur à neutrons rapides à caloporteur sodium.

Le projet français ASTRID faisait partie de la dernière catégorie avant d'être abandonné.

28. Voir : https://fr.wikipedia.org/wiki/Forum_international_Génération_IV et <https://www.gen-4.org/gif/>

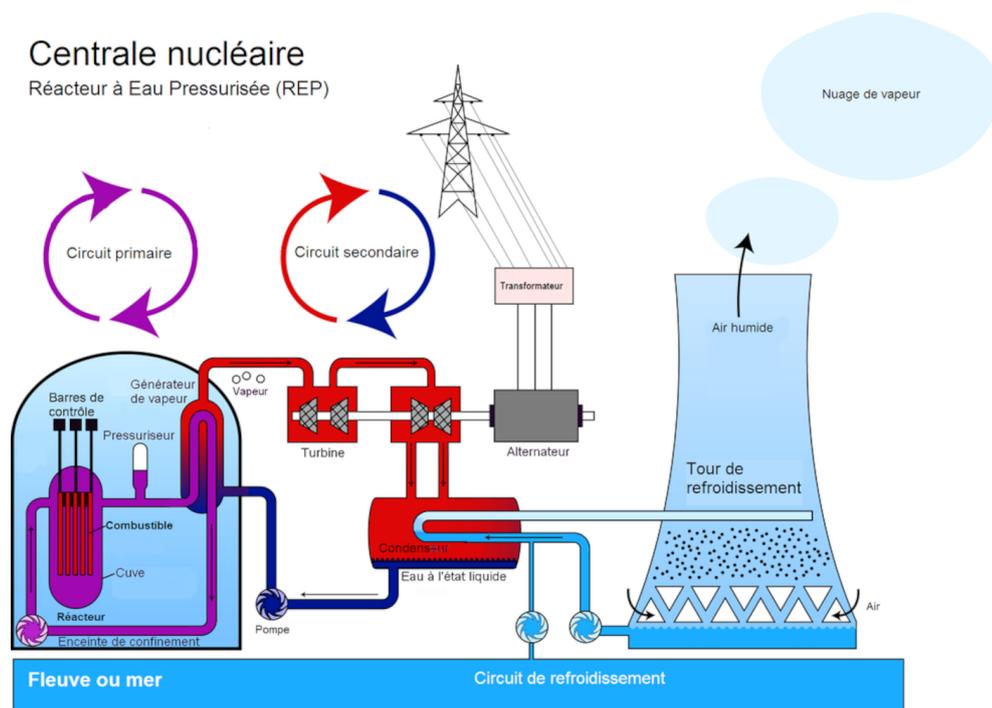


FIGURE 2.17 – Schéma d'une centrale à eau pressurisée. Source : Wikipédia / Steffen Kuntoff/Enr-v/Cjp24.

2.4.6 Les réacteurs à eau pressurisée

La filière des réacteurs à eau pressurisée (REP) est la filière la plus répandue dans le monde. La totalité des 56 réacteurs²⁹ français sont des REP avec des puissances variant entre 880 MW et 1500 MW.

L'eau sous pression (150 bars pour rester en phase liquide malgré la température élevée) est à la fois le modérateur et le fluide caloporteur. Le combustible est constitué de pastilles de dioxyde d'uranium enrichi (à 3 %) en ^{235}U .

Une centrale nucléaire à eau pressurisée est constituée de trois circuits d'eau indépendants. Le circuit primaire (en violet à la figure 2.17) dans lequel baigne le réacteur est en contact avec les crayons de combustible; c'est l'eau qu'il contient qui récupère l'énergie de la fission (fluide caloporteur et modérateur). L'eau y est activée par les neutrons et peut contenir des produits radioactifs (tritium); elle entre à une température de 295 °C et ressort à 340 °C avec un débit de 17 m³/s.

Ce circuit primaire échange (sans mélange) son énergie calorifique avec un circuit secondaire (en bleu et rouge à la figure 2.17) qui va permettre la fabrication d'électricité grâce à des turbines couplées à des alternateurs. L'échangeur produit de la vapeur d'eau à 275 °C et 60 bars. Le refroidissement de ce circuit se fait grâce à un circuit tertiaire (en bleu à la figure 2.17) en contact avec une source froide (tour de refroidissement – voir figure 2.18, rivière ou mer).

Les principales caractéristiques d'un REP de 900 MW (34 réacteurs parmi les 48 en France) sont :

- Efficacité thermodynamique³⁰ ~33 % (1000 MW électrique nécessitent 3000 MW thermique); le circuit secondaire fonctionne selon le cycle moteur de Rankine.

29. Depuis juin 2020 et l'arrêt de deux réacteurs de la centrale de Fessenheim. Les 56 réacteurs se trouvent répartis dans 18 centrales nucléaires.

30. L'efficacité attendue de l'EPR est de 35 %, grâce à une augmentation de la pression du circuit secondaire et donc de sa température.



FIGURE 2.18 – Les tours aéroréfrigérantes de la centrale nucléaire de Dampierre-en-Burly dans le Loiret. Cette centrale comporte 4 réacteurs de 900 MW. Les quatre tours mesurent 165 m de haut sur une base de 131 m de diamètre. Ces tours servent de source froide, pour refroidir l'eau du circuit secondaire, afin de limiter le réchauffement du fleuve (Loire) à proximité (les centrales en bord de mer sont dépourvues de telles tours). L'eau du circuit de refroidissement (tertiaire) y est injectée sous forme de gouttelettes, l'air qui y circule du bas vers le haut (effet cheminée), se réchauffe à leur contact et se charge d'humidité. Il s'échappe par le haut, emportant quelques gouttelettes qui forment les panaches blancs que l'on peut voir. Les tours sont en béton de forme hyperboloïde pour mieux supporter le poids de l'eau qui ruisselle et pour faciliter la convection naturelle par effet Venturi. Crédit photo : Guillaume Blanc.

- Le réacteur contient 75 tonnes de combustible (dioxyde d'uranium ou mélange de dioxyde d'uranium et de plutonium – MOX).
- Le combustible est enfermé dans 151 km de crayons de 1 cm de diamètre en zircaloy, un alliage de zirconium (157 assemblages de 264 crayons de 3,66 m)³¹.
- Rapport de modération ~ 3 (rapport entre le volume des crayons et le volume d'eau (modérateur de neutrons)³².
- Le flux de neutrons est d'environ $10^{14} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$.
- Le combustible tient trois ans avant de devenir trop empoisonné par les produits de fission (qui absorbent les neutrons); pour le produire, cela nécessite 156 t d'uranium naturel (contenant 1,1 t de ^{235}U).

On pilote³³ un réacteur avec des barres de contrôle qui absorbent les neutrons (alliage de cadmium, indium, argent, carbure de bore). Au fil du temps le combustible s'appauvrit en matière fissile et s'enrichit en produits de fission radioactifs qui absorbent les neutrons mais ne donnent pas de fission. Au départ les barres de contrôle sont plongées dans le réacteur, puis peu à peu relevées au fur et à mesure que le combustible vieillit. Au bout d'un certain temps, le combustible n'est plus assez riche pour faire diverger (c'est-à-dire amorcer la réaction en

31. Source : https://fr.wikipedia.org/wiki/Réacteur_à_eau_pressurisée

32. UO_2 a une masse volumique de $11\,000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, le cœur a donc un volume de 6 m^3 , le volume d'eau est donc de 18 m^3 , soit 24 m^3 en tout, ce qui fait un rayon de 1,8 m!

33. La réalité est évidemment plus complexe. On peut effectivement noter que quand la température augmente, la densité de l'eau baisse, donc l'efficacité de modération diminue, et le réacteur ralentit : c'est un paramètre clé pour la sûreté! Et le plus gros de l'absorption s'opère avec du bore qu'on injecte dans l'eau du circuit primaire, les barres de commande ne jouant qu'en ajustement. Le pressuriseur permet de réguler le couple pression / température.

chaîne) le réacteur. On l'arrête alors, pour décharger le combustible usagé et le remplacer par du neuf.

Sur 100 kg de combustible originel (97 kg d'uranium 238 et 3 kg d'uranium 235), il reste, après 3 ans d'utilisation :

- 1 kg d'uranium 235 (2 kg ont fissionné);
- 95 kg d'uranium 238 (2 kg se sont transformés en plutonium 239);
- 1 kg de plutonium 239 (sur les 2 kg produits, 1 kg a fissionné);
- 3 kg de produits de fission.

Environ 5 g ont été purement transformés en énergie ($E = mc^2$, soit 450 TJ!).

2.4.7 Masse critique

La **masse critique** est la masse de matériau fissile à partir de laquelle une réaction de fission s'auto-entretient; au-delà de cette masse, elle diverge (bombe). La masse critique de ^{235}U est de 48 kg, celle de ^{239}Pu est de 10 kg. Mais ce n'est pas pour autant qu'un réacteur nucléaire équivaut à 1500 bombes atomiques : pour qu'il y ait divergence et donc explosion, il faut que la masse critique soit disposée sphériquement et entourée de réflecteurs neutroniques efficaces. Un réacteur ne peut en aucun cas exploser nucléairement !

Dans un réacteur nucléaire, on contrôle la réaction en chaîne avec des barres absorbantes (de neutrons) qui sont plus ou moins insérées au cœur du réacteur. Dans une bombe, au contraire, on veut faire diverger la réaction jusqu'à l'explosion. Il faut donc au moins une masse critique de matériau fissile.

Références

- ADEME (2011), *Dans l'air du temps, l'énergie éolienne*. https://ademe.typepad.fr/files/guide_ademe_energie_eolienne.pdf.
- ADEME (2014), *Base carbone - documentation des facteurs d'émission de la base carbone*, <https://base-empreinte.ademe.fr/>.
- ADEME (2018), *Qu'est-ce que l'ACV?* <https://www.ademe.fr/expertises/consommer-autrement/passer-a-l'action/dossier/lanalyse-cycle-vie/quest-lacv>.
- Albarède F. & Thomas P. (2000), *Lien entre le $\delta_{18}\text{O}$ des glaces et la température atmosphérique — Planet-Terre*. <https://planet-terre.ens-lyon.fr/article/temperature-des-glaces.xml>.
- Althaus V. (2019), *Le capitalisme à l'assaut des sciences humaines et sociales : l'exemple des revues payantes en psychologie*, *Zilsel*, **6**(2), pp. 9–24. <https://doi.org/10.3917/zil.006.0009>.
- Andreotti B. & Noûs C. (2020), *Contre l'imposture et le pseudo-rationalisme*, *Zilsel*, **7**(2), pp. 15–53. <https://doi.org/10.3917/zil.007.0015>.
- Arevalo R., McDonough W.F. & Luong M. (2009), *The K/U Ratio of the Silicate Earth : Insights into Mantle Composition, Structure and Thermal Evolution*, *Earth and Planetary Science Letters*, **278**(3-4), pp. 361–369. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2008.12.023>.
- Arghir C., Jouini T. & Dörfler F. (2018), *Grid-Forming Control for Power Converters Based on Matching of Synchronous Machines*, *Automatica*, **95**, pp. 273–282. <https://doi.org/10.1016/j.automatica.2018.05.037>.
- Arliss J.M., Kaplan E.N. & Galvin S.L. (2005), *The effect of the lunar cycle on frequency of births and birth complications*, *American Journal of Obstetrics and Gynecology*, **192**(5), pp. 1462–1464. <https://doi.org/10.1016/j.ajog.2004.12.034>.
- Arnold E.J. (2014), *Fraude et mauvaises pratiques dans les publications scientifiques*, *Hermès, La Revue*, **70**(3), pp. 197–204. <https://doi.org/10.3917/herm.070.0197>.
- Attali G., Bidar A., Caroti D. & Coutouly R., *Esprit critique, outils et méthodes pour le second degré*, Agir (Canopé 2019). <https://www.reseau-canope.fr/notice/esprit-critique.html>.
- Attard J. (2020), *À propos du critère de réfutabilité et des hypothèses ad hoc*. <https://cortecs.org/superieur/a-propos-du-critere-de-refutabilite-et-des-hypotheses-ad-hoc/>.
- Attard J. (2021), *Internet et désinformation : une fake news? – Le Cortecs*. <https://cortecs.org/informations-medias/internet-et-desinformation-une-fake-news/>.
- Auzanneau M. (2019), *Pic pétrolier probable d'ici 2025, selon l'Agence internationale de l'énergie*. <https://www.lemonde.fr/blog/petrole/2019/02/04/pic-petrolier-probable-dici-a-2025-selon-lagence-internationale-de-lenergie/>.
- Baan R., Grosse Y., Lauby-Secretan B., Ghissassi F.E., Bouvard V., Benbrahim-Tallaa L., Guha N., Islami F., Galichet L. & Straif K. (2011), *Carcinogenicity of radiofrequency electromagnetic fields*, *The Lancet Oncology*, **12**(7), pp. 624–626. [https://doi.org/10.1016/S1470-2045\(11\)70147-4](https://doi.org/10.1016/S1470-2045(11)70147-4).
- Bailly S. (2013), *Quelle est la température du centre de la Terre?* <https://www.pourlascience.fr/sd/geosciences/quelle-est-la-temperature-du-centre-de-la-terrenbsp-11620.php>.

- Balian R. (2009), *Comparaisons des différentes formes d'énergie*. <https://culturesciencesphysique.ens-lyon.fr/ressource/Comparaison-differentes-formes-energies-Balian.xml>.
- Bar-On Y.M., Phillips R. & Milo R. (2018), *The biomass distribution on Earth*, Proceedings of the National Academy of Sciences, **115**(25), pp. 6506–6511. <https://doi.org/10.1073/pnas.1711842115>.
- Basdevant J.L., Rich J. & Spiro M., *Énergie Nucléaire* (Les Éditions de l'École polytechnique 2002).
- Benabderrazik M. (2018), *Les solutions de stockage dans la régulation du réseau électrique (1/2)*. <https://www.energystream-wavestone.com/2018/05/les-solutions-de-stockage-dans-la-regulation-du-reseau-electrique-12/>.
- Bender F.A.M., Rodhe H., Charlson R.J., Ekman A.M.L. & Loeb N. (2006), *22 Views of the Global Albedo—Comparison between 20 GCMs and Two Satellites*, Tellus, **58**, pp. 320–330. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0870.2006.00181.x>.
- Benelmir R., Lallemand A. & Feidt M. (2002), *Analyse exergétique - Définitions*, Techniques de l'Ingénieur. <https://doi.org/10.51257/a-v1-be8015>.
- Bernard C., *Introduction à l'étude de la médecine expérimentale* (Flammarion 2013).
- Berruyer (2011), *Climat : les cycles de Milankovitch*. <https://www.les-crisis.fr/climat-14-milankovitch/>.
- Berthet V., *L'erreur est humaine - Aux frontières de la rationalité* (CNRS Éditions 2018).
- Biraud F. & Zarka P. (1998), *Sur l'astrologie ; réflexions de deux astronomes*. <https://lesia.obspm.fr/perso/philippe-zarka/GlobsPZpro/reflexions.html>.
- Blanc G. (2006), *Coup de Lune ?* <http://gblanc.fr/spip.php?article14>.
- Blondel S. (2003), *Généralisation de l'espérance d'utilité : le cas des jeux de loterie en France*, Économie et Prévision, **159**(3), pp. 105–112. <https://doi.org/10.3917/ecop.159.0105>.
- Bolton J.R. & Hall D.O. (1991), *The maximum efficiency of photosynthesis*, Photochemistry and Photobiology, **53**(4), pp. 545–548. <https://doi.org/10.1111/j.1751-1097.1991.tb03668.x>.
- Bonneuil C., Choquet P.L. & Franta B. (2021), *Early warnings and emerging accountability : Total's responses to global warming, 1971–2021*, Global Environmental Change, **71**, p. 10. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2021.102386>.
- Bornard P., Pavard M. & Testud G. (2005), *Réseaux d'interconnexion et de transport : fonctionnement*, Techniques de l'Ingénieur. <https://doi.org/10.51257/a-v1-d4091>.
- Bouchet-Petersen J. (2019), *Dans la lutte climatique, les Français poussent à des contraintes*, Libération.fr. https://www.liberation.fr/france/2019/09/20/dans-la-lutte-climatique-les-francais-poussent-a-des-contraintes_1752640.
- Bouneau S. (2018a), *Comment comprendre la transition énergétique ?* in *Conférence au LPS, Orsay* (2018a).
- Bouneau S. (2018b), *Quelles sources d'énergie pour répondre aux besoins futurs ?* in *EcoClim 2018* (2018b). https://pperso.ijclab.in2p3.fr/page_perso/Appert/ECOCLIM2018/.
- Boy D. (2002), *Les Français et les para-sciences : vingt ans de mesures*, Revue Française de Sociologie, **43**(1), pp. 35–45. http://www.persee.fr/doc/rfsoc_0035-2969_2002_num_43_1_5472.
- Boy D. & Michelat G. (1986), *Croyances aux parasciences : dimensions sociales et culturelles*, Revue Française de Sociologie, **27**(2), pp. 175–204. https://www.persee.fr/doc/rfsoc_0035-2969_1986_num_27_2_2302.
- BP (2018), *BP Statistical Review of World Energy*, Technical report, BP. <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2018-full-report.pdf>.

- BP (2019), *BP Statistical Review of World Energy*. <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2019-full-report.pdf>.
- Broch H., *Comment déjouer les pièges de l'information ou les règles d'or de la zététique* (book-e-book 2008a). <https://www.book-e-book.com/livres/11-comment-dejouer-les-pieges-de-linformation-ou-les-regles-dor-de-la-zetetique-2915312126.html>.
- Broch H., *L'art du doute* (book-e-book 2008b), book-e-book edition. <https://www.book-e-book.com/livres/8-l-art-du-doute-9782915312119.html>.
- Bronner G. (2011), *Ce qu'Internet fait à la diffusion des croyances*, *Revue Européenne des Sciences Sociales*, **49**(1), pp. 35–60. <https://doi.org/10.4000/ress.805>.
- Bronner G., *La démocratie des crédules* (PUF 2013). https://www.puf.com/content/La_démocratie_des_crédules.
- Bronner G. & Géhin É., *L'inquiétant principe de précaution* (PUF 2008). <https://doi.org/10.3917/puf.bronn.2010.01>.
- Bunch K.J., Keegan T.J., Swanson J., Vincent T.J. & Murphy M.F.G. (2014), *Residential distance at birth from overhead high-voltage powerlines : childhood cancer risk in Britain 1962–2008*, *British Journal of Cancer*, **110**(5), pp. 1402–1408. <https://doi.org/10.1038/bjc.2014.15>.
- Burde G.I. (2004), *Lecture Notes on Physics of the Environment*. <http://www.bgu.ac.il/~georg/envphys.pdf>.
- Burtin A. & Silva V. (2015), *Technical and Economic Analysis of the European Electricity System with 60% RES*, Technical report, EDF R&D. https://www.oecd-neo.org/upload/docs/application/pdf/2020-07/full_cost_workshop_7_technical_and_economic_analysis_of_the_european_electricity_system_with_60_res.pdf.
- Callen H.B., *Thermodynamics and an Introduction to Thermostatistics* (Wiley 2005).
- Carlson S. (1985), *A double-blind test of astrology*, *Nature*, **318**(6045), pp. 419–425. <https://doi.org/10.1038/318419a0>.
- Caroti D. (2020), *Pourquoi enseigner l'esprit critique?* *Science et Pseudo-Sciences*, **333**. <https://www.afis.org/Pourquoi-enseigner-l-esprit-critique/>.
- Casacuberta N., Christl M., Vockenhuber C., Wefing A.M., Wacker L., Masqué P., Synal H.A. & Rutgers van der Loeff M. (2018), *Tracing the three atlantic branches entering the Arctic ocean with 129I and 236U*, *Journal of Geophysical Research : Oceans*, **123**(9), pp. 6909–6921. <https://doi.org/10.1029/2018JC014168>.
- Castelle M. (2016), *Les techniques de fabrication de la grande statuaire en bronze 1540-1660 en France*, Ph.D. thesis. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01385286/document>.
- Caton D.B. & Wheatley P.A. (1998), *Nativity and the Moon : Do Birthrates Depend on the Phase of the Moon?* *International Amateur-Professional Photoelectric Photometry Communications*, **74**, p. 50.
- CGDD (2017), *Ménages & Environnement – Les chiffres clés – Édition 2017*, Technical report, Commissariat général au développement durable. <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/sites/default/files/2018-10/Datalab-25-menages-environnement-cc-ed-2017-oct2017-b.pdf>.
- CGDD (2019a), *Bilan énergétique de la France En 2018 – Données définitives*, Technical report, Commissariat général au développement durable. <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/sites/default/files/2019-12/datalab-essentiel-195-bilan-energetique-france-2018-decembre2019.pdf>.
- CGDD (2019b), *Bilan énergétique de la France en 2018 – Données provisoires*, Technical report, Commissariat général au développement durable. <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/sites/default/files/2019-04/datalab-essentiel-173-bilan-energetique-provisoire-2018-avril2019.pdf>.

- CGDD (2020a), *Bilan énergétique de la France pour 2018*, Technical report, Commissariat général au développement durable. <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/sites/default/files/2020-01/datalab-64-bilan-energetique-france-2018-janvier2020.pdf>.
- CGDD (2020b), *L'empreinte carbone des Français reste stable*, Technical report, Commissariat général au développement durable. <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/sites/default/files/2020-01/datalab-essentiel-204-l-empreinte-carbone-des-francais-reste-stable-janvier2020.pdf>.
- Chalmers A.F., *Qu'est-ce que la science?* (Le Livre de Poche 1990).
- Chanel O., Chichilnisky G. & Basiuk A. (2020), *Décisions en situation d'incertitude, peur et catastrophes*. <https://lejournal.cnrs.fr/nos-blogs/dialogues-economiques/decisions-en-situation-dincertitude-peur-et-catastrophes>.
- Chaquin P. (2020), *Cours d'atomistique, liaison chimique et spectroscopie*. <https://www.lct.jussieu.fr/pagesperso/chaquin/>.
- Charpak G. & Broch H., *Devenez sorciers, devenez savants* (Odile Jacob 2002).
- Chevron (2007), *Diesel fuels technical review*, Technical report. <https://www.chevron.com/-/media/chevron/operations/documents/diesel-fuel-tech-review.pdf>.
- CITEPA (2019), *Gaz à effet de serre et polluants atmosphériques - bilan des émissions en France de 1990 à 2017*, Technical report, <https://www.citepa.org/fr/secten/>.
- Cook J., Oreskes N., Doran P.T., Anderegg W.R.L., Verheggen B., Maibach E.W., Carlton J.S., Lewandowsky S., Skuce A.G., Green S.A., Nuccitelli D., Jacobs P., Richardson M., Winkler B., Painting R. et al. (2016), *Consensus on consensus : a synthesis of consensus estimates on human-caused global warming*, *Environmental Research Letters*, **11**(4), p. 048002. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/4/048002>.
- Courtier P., *Équilibre radiatif de la planète terre, premiers éléments sur l'effet de serre* (École des Ponts - ParisTech 2010).
- Cummings R.E. (2020), *Writing knowledge : Wikipedia, public review, and peer review*, *Studies in Higher Education*, **45**(5), pp. 950–962. <https://doi.org/10.1080/03075079.2020.1749791>.
- Dale M.A.J. (2010), *Global energy modelling : a biophysical approach (gemba)*, Ph.D. thesis, University of Canterbury. <https://ir.canterbury.ac.nz/handle/10092/5156>.
- David E., Wolfson M. & Fraifeld V.E. (2021), *Background Radiation Impacts Human Longevity and Cancer Mortality : Reconsidering the Linear No-Threshold Paradigm*, *Biogerontology*, **22**(2), pp. 189–195. <https://doi.org/10.1007/s10522-020-09909-4>.
- Davies J. & Davies D. (2010), *Earth's surface heat flux*, *Solid Earth*, **1**, pp. 5–24. <https://doi.org/10.5194/se-1-5-2010>.
- Delaygue G. (2002), *Quelques chiffres sur les gaz à effet de serre*. <http://planet-terre.ens-lyon.fr/article/data-g-e-s.xml>.
- Delmas R., Chauzy S., Verstraete J.M. & Ferré H., *Atmosphère, océan et climat* (Belin - Pour la Science 2007).
- Diallo M., Legras B., Ray E., Engel A. & Añel J.A. (2017), *Global distribution of CO₂ in the upper troposphere and stratosphere*, *Atmospheric Chemistry and Physics*, **17**(6), pp. 3861–3878. <https://doi.org/10.5194/acp-17-3861-2017>.
- Dieudonné M. (2016), *Does electromagnetic hypersensitivity originate from nocebo responses? Indications from a qualitative study*, *Bioelectromagnetics*, **37**(1), pp. 14–24. <https://doi.org/10.1002/bem.21937>.
- DoE (2015), *An Assessment of Energy Technologies and Research Opportunities - Chapter 10 : Concepts in Integrated Analysis*, Technical report, Department of Energy. <https://www.energy.gov/sites/prod/files/2017/03/f34/qtr-2015-chapter10.pdf>.
- DOE (2020), *Global Energy Storage Database – Energy Storage Systems*. <https://www.sandia.gov/ess-ssl/global-energy-storage-database-home/>.

- Dorion N. & Mouchotte J. (2012), *Jardiner avec la Lune : mythe ou réalité*, Technical report, Société Nationale d'Horticulture de France. <https://www.snhf.org/wp-content/uploads/2016/10/jardiner-avec-la-lune.pdf>.
- Draper G., Vincent T., Kroll M.E. & Swanson J. (2005), *Childhood Cancer in Relation to Distance from High Voltage Power Lines in England and Wales : A Case-Control Study*, *BMJ*, **330**(7503), p. 1290. <https://doi.org/10.1136/bmj.330.7503.1290>.
- Drummond C. & Fischhoff B. (2017), *Individuals with greater science literacy and education have more polarized beliefs on controversial science topics*, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **114**(36), pp. 9587–9592. <https://doi.org/10.1073/pnas.1704882114>.
- Dufresne J.L. & Treiner J. (2011), *L'effet de serre atmosphérique : plus subtil qu'on ne le croit !* *La Météorologie*, **72**, pp. 31–41. <https://doi.org/10.4267/2042/39839>.
- Dugast C. & Soyeux A. (2019), *Faire sa part? Pouvoir et responsabilité des individus, des entreprises et de l'état face à l'urgence climatique*, Technical report, Carbone 4. <https://www.carbone4.com/publication-faire-sa-part>.
- Durand B. (2018), *La raréfaction prochaine des combustibles fossiles va contraindre de hâter la transition énergétique*. <https://www.europeanscientist.com/fr/opinion/rarefaction-prochaine-combustibles-fossiles/>.
- Eckerman K., Harrison J., Menzel H.G. & Clement C. (2012), *Compendium of Dose Coefficients Based on ICRP Publication 60*, *Annals of the ICRP*, **119**. [https://www.icrp.org/docs/P_119_JAICRP_41\(s\)_Compendium_of_Dose_Coefficients_based_on_ICRP_Publication_60.pdf](https://www.icrp.org/docs/P_119_JAICRP_41(s)_Compendium_of_Dose_Coefficients_based_on_ICRP_Publication_60.pdf).
- Eckley Selin N. (1998), *Tidal Power – Types & Facts*. <https://www.britannica.com/science/tidal-power>.
- EDF (2012), *Le solaire thermodynamique à concentration*. https://www.edf.fr/sites/default/files/contrib/groupe-edf/producteur-industriel/thermique/enjeux/modernisation-du-parc/le_solaire_thermodynamique_a_concentration.pdf.
- Evans S. (2021), *Analysis : Which countries are historically responsible for climate change?* <https://www.carbonbrief.org/analysis-which-countries-are-historically-responsible-for-climate-change/>.
- Factsory (2019), *Les agences réglementaires ne reflètent pas la science*. <http://factsory.org/2019/les-agences-reglementaires-ne-refletent-pas-la-science/>.
- Factsory (2021), *Bronner et sa méthodologie crédule*. <https://factsory.org/2021/bronner-et-sa-methodologie-credule/>.
- Fagherazzi G., Vilier A., Saes Sortorelli D., Lajous M., Balkau B. & Clavel-Chapelon F. (2013), *Consumption of artificially and sugar-sweetened beverages and incident type 2 diabetes in the Etude Epidémiologique auprès des femmes de la Mutuelle Générale de l'Education Nationale–European Prospective Investigation into Cancer and Nutrition cohort*, *The American Journal of Clinical Nutrition*, (97), pp. 517–523. <https://doi.org/10.3945/ajcn.112.050997>.
- Farina M., Pasquinelli E. & Zimmerman G., *Esprit Critique, Esprit Scientifique*, 1 (Le Pommier 2017).
- Farina M., Pasquinelli E. & Zimmerman G., *Esprit Critique, Esprit Scientifique*, 2 (Le Pommier 2018).
- Ferroir T. (2012), *Ce qu'il faut comprendre et retenir du $\delta_{18}O$ en tant qu'indicateur paléoclimatique*. <http://tristan.ferroir.fr/index.php/2012/01/18/ce-qu'il-faut-comprendre-et-retenir-du-delta-18-o-en-tant-quindicateur-paleoclimatique/>.
- Feynman R., *Feynman Lectures on Physics*, volume 1 (1963). https://www.feynmanlectures.caltech.edu/I_toc.html.
- Fiolet T. (2019), *Perception des risques liés à la santé et le traitement de l'information scientifique dans les médias : les résultats de l'enquête*. <https://quoidansmonassiette.fr/>

- perception-des-risques-lies-sante-le-traitement-de-linformation-scientifique-dans-medias-resultats-enquete/.
- Flocard H., Pervès J.P. & Hulot J.P. (2014), *Électricité : intermittence et foisonnement des énergies renouvelables*, Techniques de l'Ingénieur, <https://doi.org/10.51257/a-v1-be8586>.
- Foos J., *Manuel de radioactivité* (Hermann 2009).
- Foucart S., Horel S. & Laurens S., *Les gardiens de la raison* (La Découverte 2020).
- Friedlingstein P., Jones M.W., O'Sullivan M., Andrew R.M., Hauck J., Peters G.P., Peters W., Pongratz J., Sitch S., Le Quéré C., Bakker D.C.E., Canadell J.G., Ciais P., Jackson R.B., Anthoni P. *et al.* (2019), *Global Carbon Budget 2019*, Earth System Science Data, **11**(4), pp. 1783–1838. <https://doi.org/10.5194/essd-11-1783-2019>.
- Fröhlich C. (2006), *Solar Irradiance Variability since 1978, Revision of the PMOD Composite during Solar Cycle 21*, Space Science Reviews, **125**, pp. 53–65. <https://doi.org/10.1007/s11214-006-9046-5>.
- Gans J. & Leigh A. (2015), *Does the Lunar Cycle Affect Birth and Deaths?* Journal of Articles in Support of the Null Hypothesis, **11**(2), pp. 31–36. <https://www.jasnh.com/pdf/Vol11-No2-article3.pdf>.
- Ghanty Y. (2018), *Étude du lien entre la fréquence et les puissances actives pour le dimensionnement d'un microréseau alternatif îloté avec sources d'énergie renouvelables*, Ph.D. thesis, Toulouse. <https://oatao.univ-toulouse.fr/24284/>.
- GIEC (2006), *2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories - Volume 1 - General guidance and reporting*, Technical report, Intergovernmental Panel on Climate Change. https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/1_Volume1/V1_1_Ch1_Introduction.pdf.
- GIEC (2007), *Fourth Assessment Report : Climate change 2007 : The AR4 synthesis report*, Technical report, Intergovernmental Panel on Climate Change. <https://www.ipcc.ch/report/ar4/wg1/>.
- GIEC (2013), *Climate change 2013 : The Physical Science Basis*, Technical report, Intergovernmental Panel on Climate Change. <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/>.
- GIEC (2018), *Global warming of 1.5 °C*, Technical report, Intergovernmental Panel on Climate Change. <https://www.ipcc.ch/sr15/>.
- GIEC (2021), *Climate change 2021 : The physical science basis*, Technical report, Intergovernmental Panel on Climate Change. https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_Full_Report.pdf.
- Goode P.R., Pallé E., Shoumko A., Shoumko S., Montañes-Rodriguez P. & Koonin S.E. (2021), *Earth's Albedo 1998–2017 as Measured From Earthshine*, Geophysical Research Letters, **48**(17), p. e2021GL094888. <https://doi.org/10.1029/2021GL094888>.
- Gouhier C., Le Ruz P. & Herriau J.C. (2008), *Enquête citoyenne « Vivre avec une ligne THT? »*. https://www.criirem.org/wp-content/uploads/2015/11/090123_synthese_enquete_tht-2.pdf.
- Grand D., Brun C.L. & Vidil R. (2015), *Intermittence des énergies renouvelables et mix électrique*, Techniques de l'Ingénieur. <https://doi.org/10.51257/a-v1-in301>.
- Grenèche D., Chauvin A. & Laugier F. (2012), *Uranium : ressources, consommation et évolutions du marché*, Techniques de l'Ingénieur. <https://doi.org/10.51257/a-v1-bn3571>.
- Guaric A. (2020), *Climat : les chercheurs « s'attendent à des ouragans plus puissants et des pluies plus intenses »*, Le Monde.fr. https://www.lemonde.fr/planete/article/2020/08/27/climat-le-nhc-s-attend-a-des-ouragans-plus-puissants-associes-a-des-pluies-plus-intenses_6050127_3244.html.
- Guilford M.C., Hall C.A., O'Connor P. & Cleveland C.J. (2011), *A New Long Term Assessment of Energy Return on Investment (EROI) for U.S. Oil and Gas Discovery and Production*, Sustainability, **3**(10), pp. 1866–1887. <https://doi.org/10.3390/su3101866>.

- Gunn K. & Stock-Williams C. (2012), *Quantifying the global wave power resource*, *Renewable Energy*, **44**, pp. 296–304. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.01.101>.
- Hall C.A., Lambert J.G. & Balogh S.B. (2014), *EROI of Different Fuels and the Implications for Society*, *Energy Policy*, **64**, pp. 141–152. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.05.049>.
- Halley J. (2018), *L'épuisement des ressources minérales et la notion de matériaux critiques*, *La Revue Nouvelle*, **4**, pp. 34–40. <https://doi.org/10.3917/rn.184.0034>.
- Hamada L., Iyama T., Onishi T. & Watanabe S. (2009), *The Specific Absorption Rate of Mobile Phones Measured in a Flat Phantom and in the Standardized Human Head Phantom*, in *International Symposium on Electromagnetic Compatibility* (2009). https://www.ieice.org/publications/proceedings/bin/pdf_link.php?fname=21S4-1.pdf&iconf=EMC&year=2009&vol=14&number=21S4-1&lang=E.
- Hamada L. & Watanabe S. (2016), *Calibration of SAR Probe*, *Journal of the National Institute of Information and Communications Technology*, **63**(1), pp. 135–150. <https://www.nict.go.jp/publication/shuppan/kihou-journal/journal-vol63no1/journal-vol63no1-02-07.pdf>.
- Haynes W.M., *CRC Handbook of Chemistry and Physics : A Ready-Reference Book of Chemical and Physical Data* (CRC Press 2017).
- Hilbert M. & López P. (2011), *The World's Technological Capacity to Store, Communicate, and Compute Information*, *Science*, **332**, pp. 60–65. <https://doi.org/10.1126/science.1200970>.
- Hocquet A. (2020), *Reproduire un résultat scientifique : plus facile à dire qu'à faire*, *The Conversation*. <http://theconversation.com/reproduire-un-resultat-scientifique-plus-facile-a-dire-qua-faire-129848>.
- Hróbjartsson A. & Gøtzsche P.C. (2010), *Placebo interventions for all clinical conditions*, *The Cochrane Database of Systematic Reviews*, **1**, p. CD003974. <https://doi.org/10.1002/14651858.cd003974.pub3>.
- Huet S. (2018), *OGM-poisons? La vraie fin de l'affaire Séralini*. <https://www.lemonde.fr/blog/huet/2018/12/11/ogm-poisons-la-vraie-fin-de-laffaire-seralini/>.
- Huet S. (2020), *Ce que révèle le canular « Hydroxychloroquine »*. <https://www.lemonde.fr/blog/huet/2020/08/17/que-revele-le-canular-hydroxychloroquine/>.
- Hugo V., *L'art et la science* (Actes Sud 1993).
- ICNIRP (2020), *Guidelines for Limiting Exposure to Electromagnetic Fields (100 kHz to 300 GHz)*, *Health Physics*, **118**(5), pp. 483–524. <https://doi.org/10.1097/hp.0000000000001210>.
- ICRP (2017), *The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection*, Technical report, ICRP. [https://www.icrp.org/publication.asp?id=ICRP Publication 103](https://www.icrp.org/publication.asp?id=ICRP%20Publication%20103).
- IEA (2018), *World Energy Outlook 2018*, Technical report, International Energy Agency. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2018>.
- IEA (2019), *Key World Energy Statistics 2019*, Technical report. <https://www.iea.org/events/key-world-energy-statistics-2019>.
- IEA & RTE (2021), *Conditions et prérequis en matière de faisabilité technique pour un système électrique avec une forte proportion d'énergies renouvelables à l'horizon 2050*, Technical report. [https://assets.rte-france.com/prod/public/2021-01/RTE-AIE_synthese ENR horizon 2050_FR.pdf](https://assets.rte-france.com/prod/public/2021-01/RTE-AIE_synthese_ENR_horizon_2050_FR.pdf).
- INRS (2001), *Guide pour l'établissement de limites d'exposition aux champs électriques, magnétiques et électromagnétiques : champs alternatifs (de fréquence variable dans le temps, jusqu'à 300 GHz)*, Hygiène et sécurité du travail. [https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=ND 2143](https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=ND%202143).

- IUPAC (2016), *IUPAC Announces the Names of the Elements 113, 115, 117, and 118*. <https://iupac.org/iupac-announces-the-names-of-the-elements-113-115-117-and-118/>.
- Jackson J.D., *Électrodynamique classique* (Dunod 2021).
- Johnsen S., Dansgaard W. & Clausen H. (1972), *Oxygen Isotope Profiles through the Antarctic and Greenland Ice Sheets*, *Nature*, **235**, pp. 429–434. <https://doi.org/10.1038/235429a0>.
- Jouzel J. (2022), *Sensibiliser et former aux enjeux de la transition écologique et du développement durable dans l'enseignement supérieur*, Technical report. <https://www.enseignementsup-recherche.gouv.fr/fr/former-aux-enjeux-de-la-transition-ecologique-dans-le-superieur-83888>.
- Jouzel J. & Debroise A., *Le défi climatique, objectif +2 °C* (Dunod 2014).
- Jouzel J., Lorius C., J. Johnsen S. & Grootes P. (1994), *Climate Instabilities : Greenland and Antarctic Records*, *Comptes Rendus - Academie des Sciences, Serie II : Sciences de la Terre et des Planetes*, **319**. <https://hal.science/hal-03343799>.
- Juignet P. (2015), *Karl Popper et les critères de la scientificité*, *Philosophie, Science et Société*.
- Kahneman D., *Système 1 / Système 2 : les deux vitesses de la pensée* (Flammarion 2012).
- Keeling R.F., Manning A.C., McEvoy E.M. & Shertz S.R. (1998), *Methods for Measuring Changes in Atmospheric O₂ Concentration and Their Application in Southern Hemisphere Air*, *Journal of Geophysical Research : Atmospheres*, **103**(D3), pp. 3381–3397. <https://doi.org/10.1029/97JD02537>.
- Kleidon A., Miller L. & Gans F., *Physical Limits of Solar Energy Conversion in the Earth System*, in H. Tüysüz & C.K. Chan, eds., *Solar Energy for Fuels*, volume 371 (Springer International Publishing 2015), pp. 1–22. https://doi.org/10.1007/128_2015_637.
- Kopp G. & Lean J.L. (2011), *A new, lower value of total solar irradiance : Evidence and climate significance*, *Geophysical Research Letters*, **38**, p. L01706. <https://doi.org/10.1029/2010GL045777>.
- Krakowski V. (2016), *Intégration du renouvelable et stratégie de déploiement du réseau électrique : réconciliation d'échelles spatio-temporelles dans des exercices prospectifs de long terme*, Ph.D. thesis, Université de recherche Paris Sciences et Lettres. <https://pastel.archives-ouvertes.fr/tel-01557528v2>.
- Krewski D., Turner M.C., Lemyre L. & Lee J.E. (2012), *Expert vs. public perception of population health risks in Canada*, *Journal of Risk Research*, **15**(6), pp. 601–625. <https://doi.org/10.1080/13669877.2011.649297>.
- Lambert J.G., Hall C.A., Balogh S., Gupta A. & Arnold M. (2014), *Energy, EROI and quality of life*, *Energy Policy*, **64**, pp. 153–167. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.07.001>.
- Larrère C. & Larrère R. (2001), *Les OGM entre hostilité et principe de précaution*, *Courrier de l'environnement de l'INRA*, **43**. <https://hal.inrae.fr/hal-02674663>.
- Laurens S., *Militer Pour La Science*, En Temps et Lieux (Éditions EHESS 2019).
- Lavy P. (2004), *Production d'électricité par aménagements hydrauliques*, *Techniques de l'Ingénieur*. <https://doi.org/10.51257/a-v1-d4008>.
- Le Nir M. (2008), *Ressources géothermiques du département de l'Essonne*, Technical Report BRGM/RP-56966-FR, Bureau de Recherche Géologique et Minière. <http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-56966-FR.pdf>.
- Legras B., Dufresne J.L. & Megie G. (2000), *Quelles sont les propriétés communes des gaz à effet de serre?* <http://planet-terre.ens-lyon.fr/article/gaz-effet-serre.xml>.
- Levrard B. (2005), *Cycles de Milankovitch et variations climatiques : dernières nouvelles*. <https://planet-terre.ens-lyon.fr/article/milankovitch-2005.xml>.

- Lions J.L., Manley O.P., Temam R. & Wang S. (1997), *Physical Interpretation of the Attractor Dimension for the Primitive Equations of Atmospheric Circulation*, Journal of the Atmospheric Sciences, **54**(9), pp. 1137–1143. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1997\)054%3C1137:PIOTAD%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1997)054%3C1137:PIOTAD%3E2.0.CO;2).
- Lorenz E.N. (1963), *Deterministic Nonperiodic Flow*, Journal of the Atmospheric Sciences, **20**(2), pp. 130–141. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1963\)020%3C0130:DNF%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1963)020%3C0130:DNF%3E2.0.CO;2).
- Lorius C. & Merlivat L. (1975), *Distribution of Mean Surface Stable Isotopes Values in East Antarctica : Observed Changes with Depth in Coasted Area*, General assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics; Grenoble, France; 25 Aug 1975. https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/07/242/7242101.pdf?r=1.
- Machon D., *Les bavures scientifiques, quand les scientifiques se prennent les pieds dans la démarche*, volume 36 (book-e-book 2015). <https://www.book-e-book.com/livres/133-les-bavures-scientifiques-9782372460095.html>.
- Messerli F.H. (2012), *Chocolate Consumption, Cognitive Function, and Nobel Laureates*, New England Journal of Medicine, **367**(16), pp. 1562–1564. <https://doi.org/10.1056/NEJMon1211064>.
- Miller L.M., Gans F. & Kleidon A. (2011), *Estimating Maximum global land surface wind power extractability and associated climatic consequences*, Earth System Dynamics, pp. 1–12. <https://doi.org/10.5194/esd-2-1-2011>.
- Monteith J.L. (1972), *Solar Radiation and Productivity in Tropical Ecosystems*, The Journal of Applied Ecology, **9**(3), p. 747. <https://doi.org/10.2307/2401901>.
- Morton-Pradhan S., Bay R.C. & Coonrod D.V. (2005), *Birth rate and its correlation with the lunar cycle and specific atmospheric conditions*, American Journal of Obstetrics and Gynecology, **192**(6), pp. 1970–1973. <https://doi.org/10.1016/j.ajog.2005.02.066>.
- Moyen J.F. (2001), *Connaître le géotherme en profondeur*. <https://planet-terre.ens-lyon.fr/article/geotherme-profond.xml>.
- Nénot J.C. (2009), *Recommandations 2007 de la Commission internationale de protection radiologique*, Technical report, Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (France). http://www.icrp.org/docs/P103_French.pdf.
- Ngô C. (2016), *Stockage de l'énergie*, Techniques de l'Ingénieur. <https://doi.org/10.51257/a-v1-be8090>.
- Nifenecker H. (2014), *Physique des éoliennes*, Techniques de l'Ingénieur. <https://doi.org/10.51257/a-v1-be8584>.
- OFSP (2016), *Four à micro-ondes*, Technical report, Office fédéral de la santé publique (Suisse). <https://www.bag.admin.ch/dam/bag/fr/dokumente/str/nis/faktenblaetter-emf/faktenblatt-mikrowellenofen.pdf.download.pdf/faktenblatt%20mikrowellenofen%20f.pdf>.
- OIE (2017), *Gestion de l'équilibre du système électrique*, Observatoire de l'Industrie Électrique. https://observatoire-electricite.fr/IMG/pdf/oie_-_fiche_pedago_flexi_avril_2017.pdf.
- OIE (2020), *Primaire ou finale : comment comptabiliser l'énergie?* Observatoire de l'Industrie Électrique. https://observatoire-electricite.fr/IMG/pdf/fiche_pedago_primaire_ou_finale_-_coment_comptabiliser_l_energie_-_mars_2020.pdf.
- Oreskes N. & Conway E.M., *Marchands de Doute* (Le Pommier 2012).
- Osmundsen M., Bor A., Vahlstrup P.B., Bechmann A. & Petersen M.B. (2021), *Partisan Polarization Is the Primary Psychological Motivation behind Political Fake News Sharing on Twitter*, American Political Science Review, **115**(3), pp. 999–1015. <https://doi.org/10.1017/S0003055421000290>.

- Parrenin F. (2013), *Quels sont les liens entre CO₂ et température?* <https://www.climat-en-questions.fr/reponse/mecanismes-devolution/liens-entre-co2-temperature-par-frederic-parrenin>.
- Parrenin F., Masson-Delmotte V., Köhler P., Raynaud D., Paillard D., Schwander J., Barbante C., Landais A., Wegner A. & Jouzel J. (2013), *Synchronous Change of Atmospheric CO₂ and Antarctic Temperature During the Last Deglacial Warming*, *Science*, **339**(6123), pp. 1060–1063. <https://doi.org/10.1126/science.1226368>.
- Pegion K. (2020), *Des prévisions météorologiques à 28 jours*, *Pour la Science*, **515**. <https://www.pourlascience.fr/sd/climatologie/des-previsions-meteorologiques-a-28-jours-19923.php>.
- Pennec F.L. (2001), *Analyse de champ proche et de couverture radioélectrique*, Technical report, École Nationale Supérieure des Télécommunications de Bretagne. [https://www.anfr.fr/fileadmin/mediatheque/documents/expace/Analyse de champ proche et de couverture radioelectrique.pdf](https://www.anfr.fr/fileadmin/mediatheque/documents/expace/Analyse_de_champ_proche_et_de_couverture_radioelectrique.pdf).
- Perdijon J., *La formation des idées en physique, du phénomène à la théorie* (Dunod 2007).
- Philip S.Y., Kew S.F., van Oldenborgh G.J., Anslow F.S., Seneviratne S.I., Vautard R., Coumou D., Ebi K.L., Arrighi J., Singh R., van Aalst M., Pereira Marghidan C., Wehner M., Yang W., Li S. *et al.* (2021), *Rapid Attribution Analysis of the Extraordinary Heatwave on the Pacific Coast of the US and Canada June 2021*, *Earth System Dynamics*. <https://doi.org/10.5194/esd-2021-90>.
- Planton S. (2020), *La température moyenne de la Terre*, Encyclopédie de l'environnement. <https://www.encyclopedie-environnement.org/climat/temperature-moyenne-terre-rechauffement-climatique/>.
- Poincaré H., *La science et l'hypothèse* (Ernest Flammarion 1917).
- Pontcerq, *De la faiblesse de l'esprit critique envisagé comme compétence* (2022). [http://www.pontcerq.fr/wp-content/uploads/2022/09/De-la-faiblesse-de-lesprit-critique-envisagé-etc..pdf](http://www.pontcerq.fr/wp-content/uploads/2022/09/De-la-faiblesse-de-lesprit-critique-envisage-etc..pdf).
- Preuss P. (2011), *What Keeps the Earth Cooking?* <https://newscenter.lbl.gov/2011/07/17/kamland-geoneutrinos/>.
- Rakotoarison S. (2014), *Karl Popper (1902-1994) : la réfutabilité, critère de la scientificité*. <http://www.agoravox.fr/culture-loisirs/culture/article/karl-popper-1902-1994-la-156881>.
- Ramunni G., *Les lieux des erreurs scientifiques* (Le Cavalier Bleu 2012).
- Ramus F. (2014), *Comprendre le système de publication scientifique*, *Science et Pseudo-Sciences*, **308**. <https://www.afis.org/Comprendre-le-systeme-de-publication-scientifique>.
- Rasplus V., *Ce que la science veut dire, ce que la pseudo-science veut faire*, in *Sciences et Pseudo-Sciences, Regards Des Sciences Humaines*, Sciences et Philosophie (Éditions Matériologiques, « Sciences & philosophie » 2014).
- Ravijen (2018), *L'empreinte carbone des français, un sujet tabou?* <http://ravijen.fr/?p=440>.
- Reinsel D., Gantz J. & Rydning J. (2018), *The Digitization of the World from Edge to Core*. <https://www.seagate.com/files/www-content/our-story/trends/files/idc-seagate-dataage-whitepaper.pdf>.
- Rochoy M. (2020), *Le meilleur article de tous les temps*. <http://www.mimiryudo.com/blog/2020/08/le-meilleur-article-de-tous-les-temps/>.
- Roques A., *Processionary Moths and Climate Change : An Update* (Springer Dordrecht 2017). <https://doi.org/10.1007/978-94-017-9340-7>.
- Rowe D. (2018), *Emmy Noether : le centenaire d'un théorème*, *Pour la Science*, **490**. <https://www.pourlascience.fr/sd/mathematiques/emmy-noether-le-centenaire-d-un-theoreme-14564.php>.

- Royer J.F. & Nicolis C. (1994), *Chaos et Météorologie*, La Météorologie, **8**(5), pp. 38–53. <https://doi.org/10.4267/2042/53401>.
- RTE (2004), *Mémento de la sûreté du système électrique*. <https://docplayer.fr/1151047-Memento-de-la-surete-du-systeme-electrique.html>.
- RTE (2016), *Bilan électrique 2016*, Technical report, Réseau de Transport d'Électricité.
- RTE (2017), *Bilan électrique 2017*, Technical report, Réseau de Transport d'Électricité. https://assets.rte-france.com/prod/public/2020-06/bilan_electrique_2017.pdf.
- RTE (2018a), *Bilan Électrique 2018*, Technical report, Réseau de Transport d'Électricité. https://assets.rte-france.com/prod/public/2021-03/Bilan_electrique_2018.pdf.
- RTE (2018b), *Panorama de l'électricité renouvelable au 31 decembre 2018*, Technical report. [https://assets.rte-france.com/prod/public/2020-06/Panorama de l'électricité renouvelable au 31 decembre 2018_compressed.pdf](https://assets.rte-france.com/prod/public/2020-06/Panorama_de_l_electricite_renouvelable_au_31_decembre_2018_compressed.pdf).
- RTE (2019), *Bilan électrique 2019*, Technical report, Réseau de Transport d'Électricité. https://assets.rte-france.com/prod/public/2020-06/bilan-electrique-2019_1_0.pdf.
- Rubin G.J., Das Munshi J. & Wessely S. (2005), *Electromagnetic Hypersensitivity : A Systematic Review of Provocation Studies*, Psychosomatic Medicine, **67**(2), pp. 224–232. <https://doi.org/10.1097/01.psy.0000155664.13300.64>.
- Russell B., *Is There a God?* in J.G. Slater & P. Köllner, eds., *The Collected Papers of Bertrand Russell, Volume 11 : Last Philosophical Testament, 1943-68* (Routledge, London 1997), pp. 543–548. https://cortecs.org/wp-content/uploads/2014/12/Is-there-a-God_Russell_1952.pdf.
- Sapy G. (2019), *Les énergies renouvelables intermittentes mettent-elles en cause la stabilité des réseaux?* Science et Pseudo-sciences, **329**. <https://www.afis.org/Les-energies-renouvelables-intermittentes-mettent-elles-en-cause-la-stabilite>.
- Sawerysyn J.P. (1993), *Les pouvoirs calorifiques*, Bulletin de l'Union des Physiciens, **87**, p. 11. <http://materiel-physique.ens-lyon.fr/Logiciels/CD N° 3 BUP DOC V 4.0/Disk 1/TEXTES/1993/07520401.PDF>.
- SDES (2021), *Chiffres clés du climat - France, Europe et Monde - Édition 2021*, Technical report. https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/sites/default/files/2020-12/datalab_81_chiffres_cles_du_climat_edition_2021.pdf.
- Siméon G. (2012), *Données le vertige*. https://www.liberation.fr/futurs/2012/12/03/donnees-le-vertige_864585/.
- Sourisse (2018), *Biomasse et énergie : des ressources primaires aux produits énergétiques finaux*. <https://www.encyclopedie-energie.org/biomasse-et-energie-des-ressources-primaires-aux-produits-energetiques-finaux/>.
- Speich S., Reverdin G., Mercier H. & Jeandel C. (2015), *L'océan, réservoir de chaleur*, Plateforme Océan & Climat. http://www.ocean-climate.org/wp-content/uploads/2015/03/FichesScientifiques-ocean-reservoir-chaleur_BD.pdf.
- Staboulidou I., Soergel P., Vaske B. & Hillemanns P. (2008), *The Influence of Lunar Cycle on Frequency of Birth, Birth Complications, Neonatal Outcome and the Gender : A Retrospective Analysis*, Acta Obstetrica et Gynecologica Scandinavica, **87**(8), pp. 875–879. <https://doi.org/10.1080/00016340802233090>.
- Strugarek A., Beaudoin P., Charbonneau P., Brun A.S. & do Nascimento J.D. (2017), *Reconciling Solar and Stellar Magnetic Cycles with Nonlinear Dynamo Simulations*, Science, **357**(6347), pp. 185–187. <https://doi.org/10.1126/science.aal3999>.
- Thomas P. (2014), *La chaleur de la Terre et la géothermie*. <https://planet-terre.ens-lyon.fr/article/chaleur-Terre-geothermie.xml>.
- Thompson P.D. (1957), *Uncertainty of Initial State as a Factor in the Predictability of Large Scale Atmospheric Flow Patterns*, Tellus, **9**(3), pp. 275–295. <https://doi.org/10.3402/tellusa.v9i3.9111>.

- Treiner J. (2015), *Jouer avec les chiffres du climat : une approche par budget carbone*, *Reflats de la Physique*, **43**. <https://doi.org/10.1051/refdp/201543046>.
- Treiner J. (2016), *Le taux de retour énergétique, une mesure de l'efficacité sociétale des sources d'énergie*, *Techniques de l'Ingénieur*. <https://www.techniques-ingenieur.fr/actualite/articles/chronique-retour-energetique-39038/>.
- Treiner J. (2018), *Énergies de stock, énergies de flux*, *Le Bup*, **112**. https://enseignement-scientifique.discip.ac-caen.fr/IMG/pdf/energies_de_stock_energies_de_flux.pdf.
- Trenberth K.E., Fasullo J.T. & Kiehl J. (2009), *Earth's Global Energy Budget*, *Bulletin of the American Meteorological Society*, **90**(3), pp. 311–324. <https://doi.org/10.1175/2008BAMS2634.1>.
- Turcotte D.L. & Schubert G., *Geodynamics* (Cambridge University Press 2002).
- UNESCO (2005), *Vers les sociétés du savoir*, Technical report, UNESCO. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000141907>.
- Valentin L., *Le Monde Subatomique* (Hermann 1986).
- Valentin L., *L'univers mécanique, introduction à la physique et à ses méthodes* (Hermann 1995).
- Verrier M., Chay P. & Gabion M. (2009), *Turboalternateurs*, *Techniques de l'Ingénieur*. <https://doi.org/10.51257/a-v2-d3530>.
- Von Neumann J. & Morgenstern O., *Theory of games and economic behavior* (Princeton University Press 1944).
- Weißbach D., Ruprecht G., Huke A., Czerski K., Gottlieb S. & Hussein A. (2013), *Energy intensities, EROIs (energy returned on invested), and energy payback times of electricity generating power plants*, *Energy*, **52**, pp. 210–221. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.01.029>.
- Witthöft M. & Rubin G.J. (2013), *Are Media Warnings about the Adverse Health Effects of Modern Life Self-Fulfilling? An Experimental Study on Idiopathic Environmental Intolerance Attributed to Electromagnetic Fields (IEI-EMF)*, *Journal of Psychosomatic Research*, **74**(3), pp. 206–212. <https://doi.org/10.1016/j.jpsychores.2012.12.002>.
- Yeganefar M. (2013), *À propos de la science et de la méthode scientifique*. <https://blogs.univ-poitiers.fr/n-yeganefar/2013/09/07/a-propos-de-la-science-et-de-la-methode-scientifique/>.
- Yiou P., *Le temps s'est-il détraqué? Comprendre les catastrophes climatiques* (Buchet-Chastel 2015).
- Zhu X.G., Long S.P. & Ort D.R. (2008), *What is the maximum efficiency with which photosynthesis can convert solar energy into biomass?* *Current Opinion in Biotechnology*, pp. 153–159. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2008.02.004>.