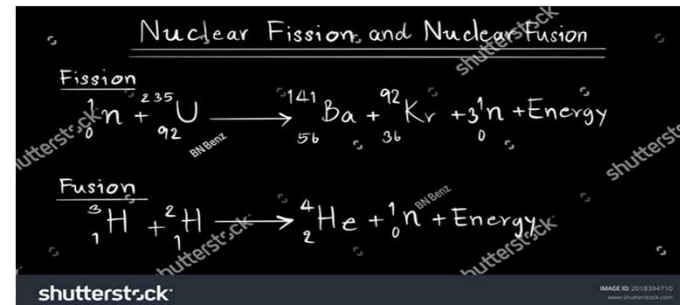
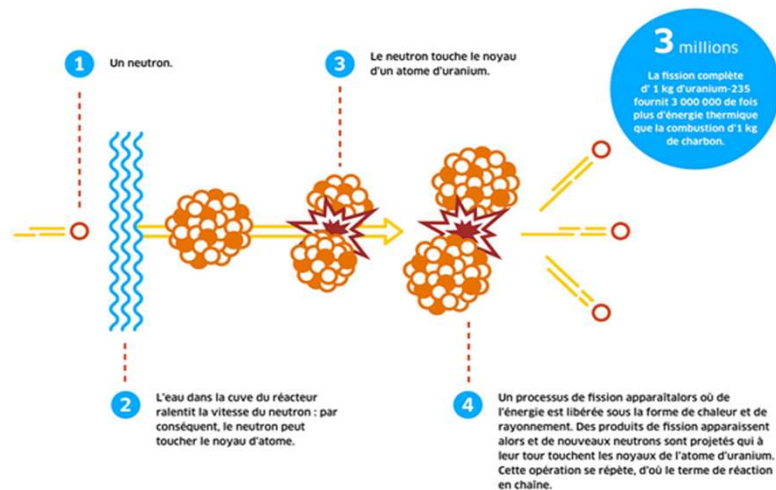


## La technologie nucléaire – Principes généraux (1/3)

1. Découverte de la radioactivité en 1898 (Becquerel/Curie). Les principes de base de la physique atomique et nucléaire sont développés et appliqués entre la seconde guerre mondiale et les années 60.
2. Deux (2) types de réactions atomiques : fusion et fission.

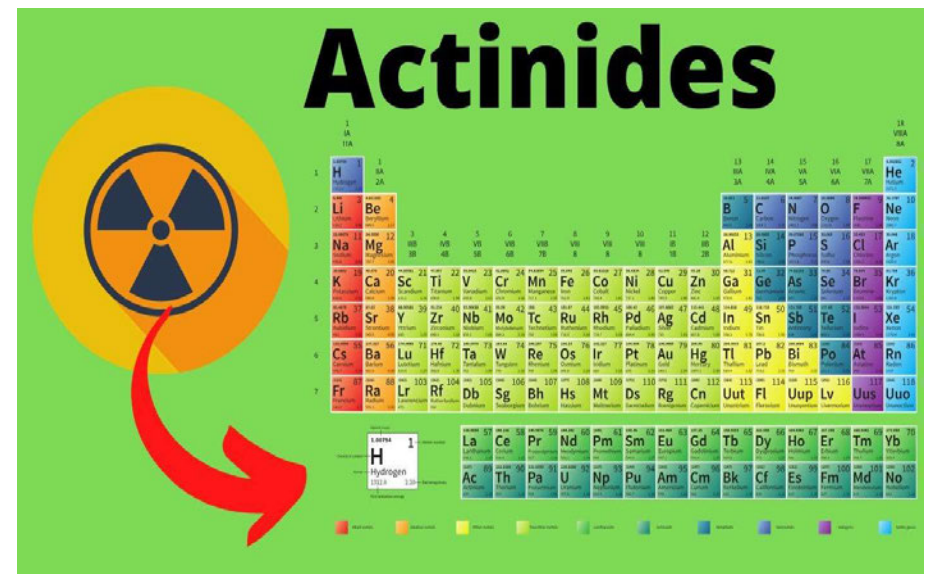


Tous les réacteurs nucléaires fonctionnent selon le principe de fission nucléaire. Un atome frappé par un neutron se brise en émettant plusieurs neutrons, des radiations ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ), de la chaleur ainsi que des produits de fission.

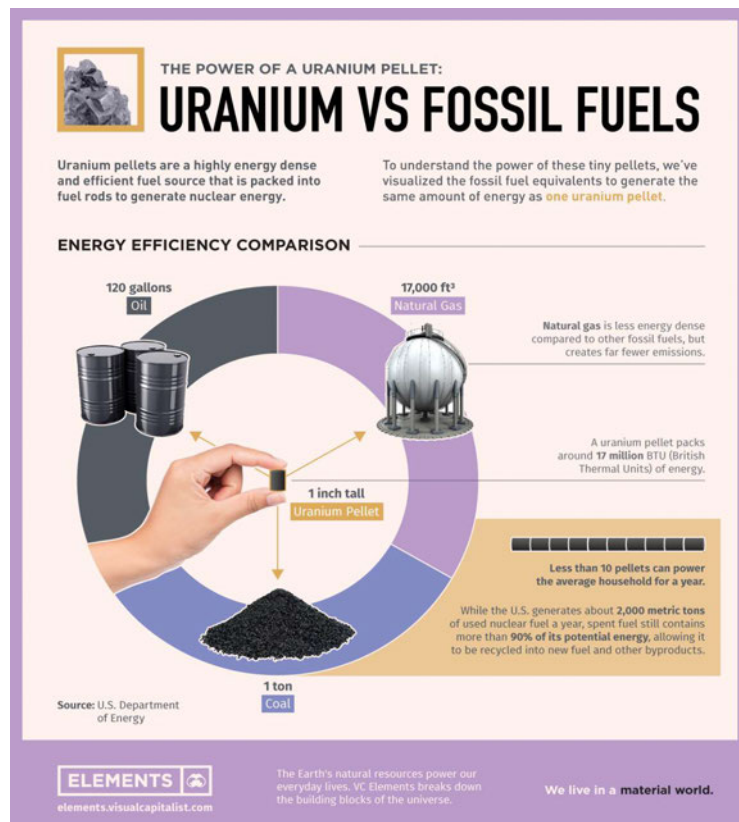
↳ C'est une réaction en chaîne qui doit être contrôlée.

## La technologie nucléaire – Principes généraux (2/3)

3. Un réacteur nucléaire nécessite **trois (3) éléments principaux** pour fonctionner : un **combustible fissile** (ou fissile), un **fluide caloporteur** pour refroidir le combustible et, pour la technologie dite à neutrons thermiques, un **fluide modérateur** pour ralentir les neutrons. La fission dite à neutrons rapides ne nécessite pas de fluide modérateur.
4. Seulement deux (2) minerais naturels, **Uranium et Thorium** (famille des actinides), présentent les caractéristiques suffisantes pour devenir fissile.
  - ↳ L'uranium est le principal combustible des réacteurs de production électrique.
5. L'uranium naturel contient 99,3% d' $U_{238}$  et 0,7% d' $U_{235}$ . **C'est le  $U_{235}$  qui est fissile.** La plupart des technologies demandent que l'uranium soit « enrichi » en augmentant la teneur en  $U_{235}$  jusqu'à 5% (technologie à neutrons thermiques), voire 20% (neutrons rapides). Au-delà c'est pour des fins militaires ou de recherche.



## La technologie nucléaire – Principes généraux (3/3)



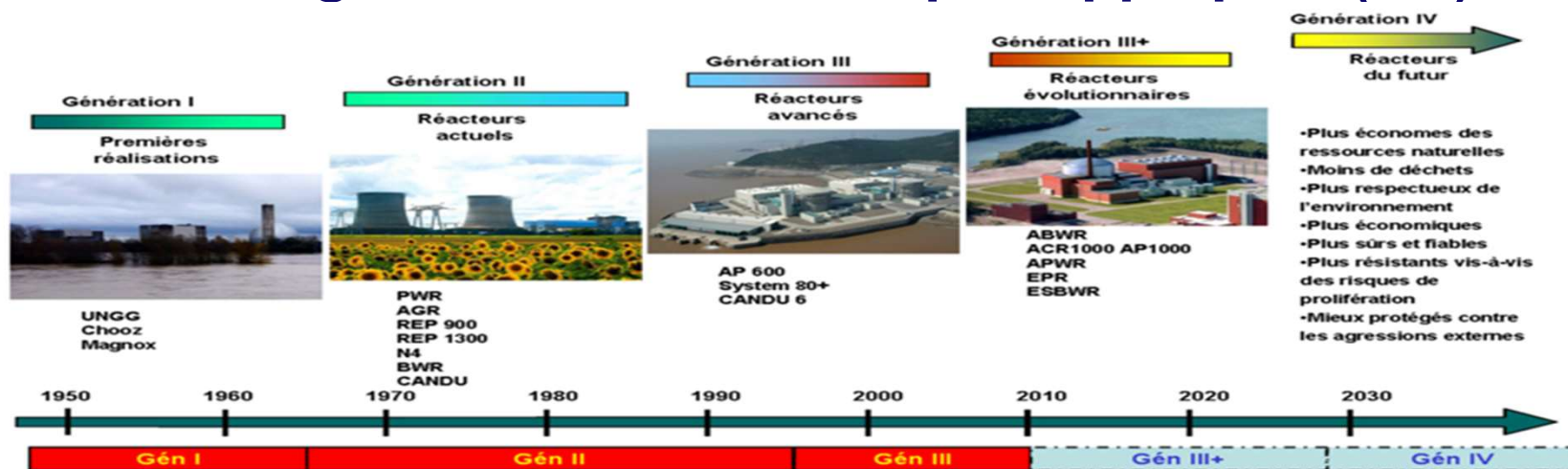
6. La technologie nucléaire permet de produire une grande quantité d'énergie **sans émission de GES**.

7. Dans un réacteur à **neutrons thermiques**, jusqu'à **5%** de l'énergie disponible dans l'uranium est extraite.

Une pastille d'uranium d'environ 1,5 cm<sup>3</sup> produit l'équivalent énergétique de 807 kg de charbon, 677 litres de mazout ou 476 m<sup>3</sup> de gaz naturel. Les réacteurs nucléaires sont conçus pour une production constante, avec un facteur d'utilisation élevé.

8. Les neutrons rapides ont l'avantage de faire fissionner **tous les noyaux lourds** et non les seuls éléments fissiles. Par conséquent, dans un réacteur à **neutrons rapides** une proportion **beaucoup plus importante d'énergie peut être extraite (> 90%)**.

## La technologie nucléaire – Principes appliqués (1/2)

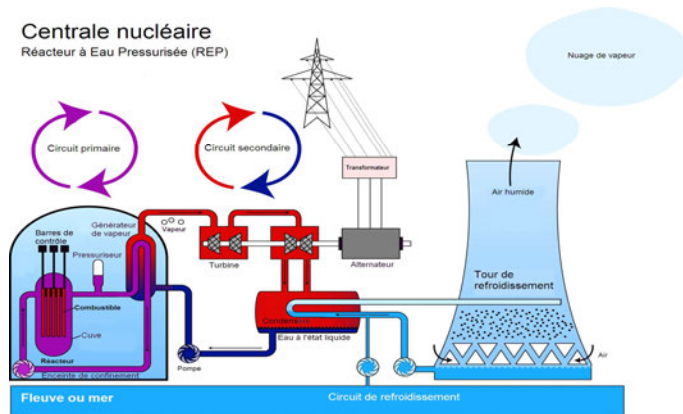


1. Les **réacteurs** refroidis à l'eau sont les plus courants, c'est la génération 3 et 3+. Ils utilisent un fluide modérateur pour ralentir les neutrons émis (neutrons thermiques – rendement < 5%).
2. Les PRM Gen3+ génèrent du combustible usagé contenant des déchets nucléaires à vie longue, similaires à ceux générés par les réacteurs actuels.
3. Ils fonctionnent à pression élevée [REDACTED]
4. Des réacteurs avancés utilisent les neutrons rapides (sans modérateur pour les ralentir), c'est la génération 4 (Gen4). Ils ne peuvent être refroidis à l'eau qui ralentit les neutrons, et utilisent soit des gaz chauds, soit des métaux liquides (sodium, plomb), soit des sels fondus.

## La technologie nucléaire – Principes appliqués (2/2)

5. Certains modèles de réacteurs de Gen4 (donc à neutrons rapides) utilisent plus efficacement le combustible [REDACTED] Ces modèles de réacteurs peuvent même recycler leur propre combustible ou celui des réacteurs Gen3.
6. Les Gen4 fonctionnent à pression basse [REDACTED]
7. Les réacteurs de génération 4 ont été testés et sont techniquement démontrés. Cependant des défis restent à relever pour leur exploitation commerciale. Les produits utilisés sont corrosifs et leur conditionnement est délicat et complexe.

Centrale nucléaire  
Réacteur à Eau Pressurisée (REP)

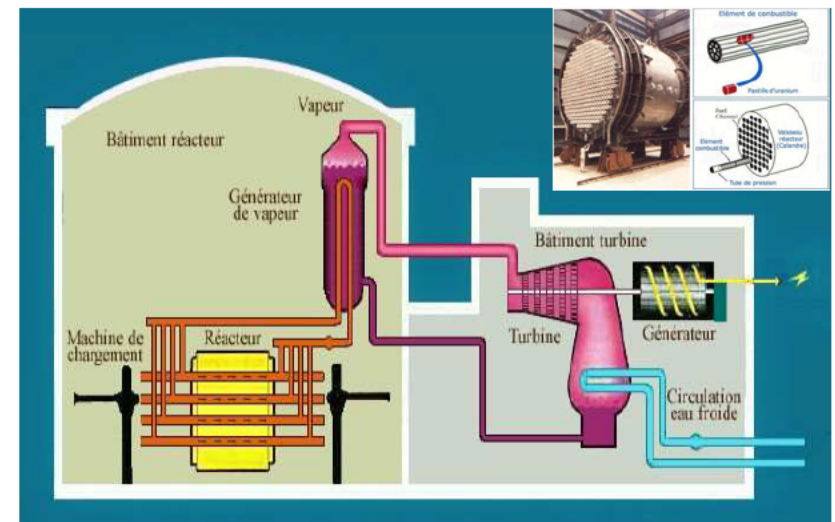


8. Dans cet exemple, le circuit d'eau caloporteur sous pression refroidit le combustible et réchauffe un circuit secondaire qui alimente la turbine en vapeur, elle-même entraînant un alternateur pour générer de l'électricité. Un troisième circuit en boucle ouverte refroidit le circuit secondaire. Des technologies diverses de réacteurs fonctionnent sur le même principe.

**L'enceinte de confinement vise à retenir les rayonnements et les produits de fission.**

## La technologie nucléaire – Le CANDU

1. Les réacteurs CANDU® sont des réacteurs refroidis à l'eau sous pression (PWR), mais cette fois à l'eau lourde. La présence de l'eau lourde permet l'utilisation de combustible d'uranium naturel sans enrichissement.
2. L'eau lourde est une molécule naturellement présente dans l'eau courante en très petites quantités. L'eau lourde a un comportement chimique très semblable à l'eau légère mais est plus dense, comme son nom l'indique.
3. La technologie Canadienne CANDU® a été utilisée avec succès dans de nombreuses installations nucléaires civiles et expérimentales (Canada-Ontario-Québec-Nouveau-Brunswick, Indes, Pakistan, Argentine, Chine, Corée du sud, Roumanie).
4. Plusieurs centrales CANDU® ont fait l'objet de projets de réfection pour doubler leur vie utile de 30 à 60 ans. Le projet de réfection de la centrale de Gentilly-2 a été abandonné en cours de route.
5. Rappelons l'efficacité des réacteurs CANDU® pour produire des radio-isotopes à usage médical. Le Canada a toujours été le chef de file mondial de la production de radio-isotopes à des fins médicales.
6. Plusieurs projets de réacteurs CANDU® avancés ont été amorcés mais n'ont pas été complétés (ACR-1000, Enhanced-C6). Un projet de PRM CANDU existe mais ne semble pas progresser (CSMR).





## La technologie nucléaire – Le combustible nucléaire (1/2)

- 
- The diagram illustrates the components of a fuel assembly (gaine) in two parts. The top part shows a detailed view of the assembly's internal structure, including the 'Gaine' (cladding), 'Pastille d'uranium enrichie' (enriched uranium pellet), and 'Ressort' (spring). The bottom part shows a full-length view of the assembly, which is 4 m long. It includes labels for the 'Plaque de pied' (foot plate), 'Tube guide' (guide tube), 'Grappe de commande' (control rod cluster), and 'Araignée' (spider).

grappe de combustible

Tube de fibre

grille d'endboute

grille d'appui

bouchon

grille d'exhaust

pastilles de combustible

Combustible

Génie

© Les Éditions Québec: Amérique inc. Illustrations tirées du Nouveau de l'énergie nucléaire, [www.quebec-amerique.com](http://www.quebec-amerique.com)

Diagram illustrating the evolution of nuclear waste composition over four years.

**Initial Composition (Left):**

- 97% Uranium 238
- 3% Uranium 235

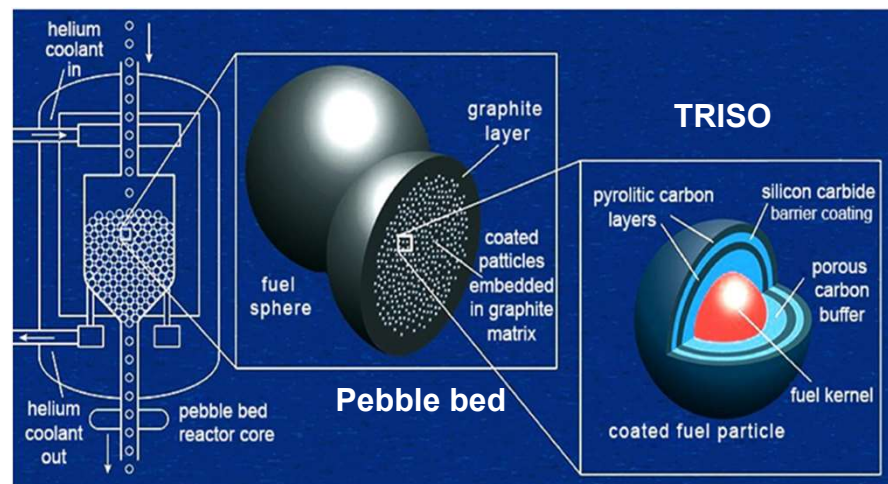
**Four years later (Right):**

- 94% Uranium 238 (recyclable)
- 1% Uranium 235 (recyclable)
- 1% Plutonium (recyclable)
- 0,1% Actinides mineurs
- 4% Produits de fission (déchets ultimes)

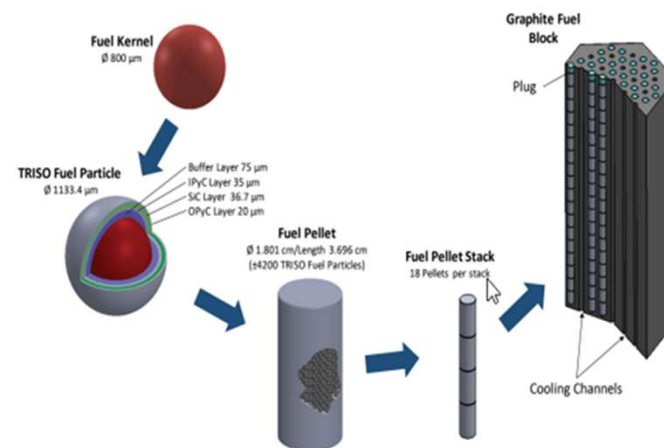
- Réf. [https://laradioactivitefr.gatsbyjs.io/energie\\_nucleaire/combustiblesmixteslemox](https://laradioactivitefr.gatsbyjs.io/energie_nucleaire/combustiblesmixteslemox)

## La technologie nucléaire – Le combustible nucléaire (2/2)

3. Un nouveau type de **combustible plus robuste** est en développement, le **TRISO**. Il s'agit de minuscules billes d'uranium enrobées de matériaux très résistants et agglutinées dans une matrice de carbone circulaire (« pebble ») de la grosseur d'une balle de tennis) ou dans une matrice cylindrique. Des réacteurs Gen4 utilisent le TRISO.



### Éléments prismatiques



4. Des combustibles sous forme liquide sont également en développement pour certains modèles de réacteurs Gen4 à sels fondus ou métal liquide.