

FR0203066
7NIS-ER-1386

LE PLUTONIUM (Pu)

QU'EST-CE QUE LE PLUTONIUM ?

Le plutonium est un métal dur, blanc, qui a l'apparence du fer. Il fond à 640°C, se transforme en oxyde de plutonium au contact de l'air et peut s'enflammer.

Le plutonium est radioactif, il s'agit d'un "radioélément". Comme tous les atomes, il est composé d'un noyau (constitué de neutrons et de protons) et d'électrons.

Le noyau du plutonium comporte 94 protons. Le plutonium se situe donc en 94^{ème} position dans le tableau de Mendeleïev, qui regroupe les éléments constitutifs de l'univers.

Le nombre de protons contenus dans un noyau de plutonium est toujours le même (94). Par contre, d'un isotope à l'autre, le nombre de neutrons est variable. Il existe ainsi quinze isotopes du plutonium : du plutonium 232 (94 protons et 138 neutrons) au plutonium 246 (94 protons et 152 neutrons). Ceux que l'on retrouve en plus grandes quantités dans le domaine de l'industrie nucléaire sont les isotopes 239, 240 et 241.

Le noyau du plutonium est instable : un déséquilibre, dû à un excédent de matière, entraîne une réaction d'éjection de particules et d'émission de rayonnements pour ramener l'atome à un état d'équilibre. C'est cette réaction que l'on appelle la radioactivité.

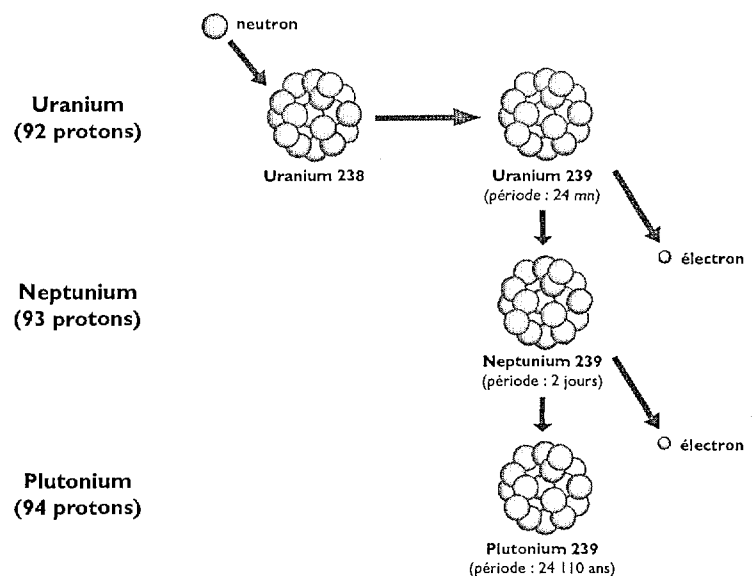
D'où vient le plutonium ?

Le plutonium 239 "primordial" a été formé lors de la création de l'univers. Sa période radioactive étant de 24 110 ans, il a disparu. Seul l'isotope 244, formé au même moment, mais qui a une période radioactive de 83 millions d'années, demeure à l'état de traces. Aujourd'hui, des quantités infinitésimales de plutonium continuent à se former naturellement. Elles résultent de l'effet des rayonnements cosmiques sur l'uranium 238 présent dans les roches de la croûte terrestre.

La majorité du plutonium présent actuellement dans le monde est d'origine artificielle. Il se forme par réaction nucléaire à partir de l'uranium utilisé comme combustible.

Au cours de cette réaction, l'uranium 238 capture un neutron et se transforme en uranium 239. A son tour, l'uranium 239 transmute en neptunium 239 en perdant un électron. Ensuite, de la même façon, le neptunium 239 se transforme en plutonium 239.

Formation du plutonium 239



Après un traitement mécanique et chimique du combustible utilisé dans une usine spécialisée, le plutonium est récupéré sous forme de nitrate, converti ensuite en oxyde (PuO₂).

Un peu d'histoire

Mirène et Frédéric Joliot-Curie (Prix Nobel 1935) ont été les premiers à démontrer, en 1934, qu'il était possible de créer artificiellement des éléments radioactifs.

En décembre 1940, à l'université de Berkeley, en Californie, **Glenn Theodore Seaborg** (Prix Nobel 1951) et son équipe découvrent le plutonium en "bombardant" une cible d'uranium 238.

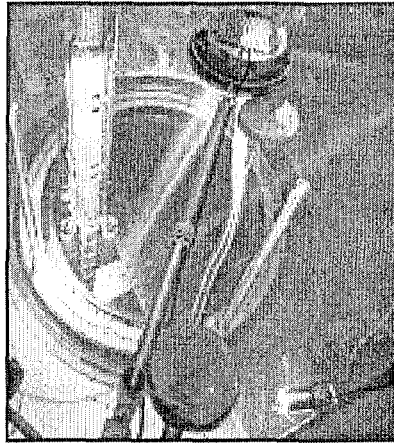


Glenn Theodore Seaborg

En 1941, il découvre le plutonium 239 dont les premières applications ont été militaires avec la mise au point de l'arme atomique. Depuis, les recherches ont été orientées vers des utilisations pacifiques du plutonium comme la production d'électricité.

A quoi sert le plutonium ?

Deux usages industriels du plutonium sont connus :

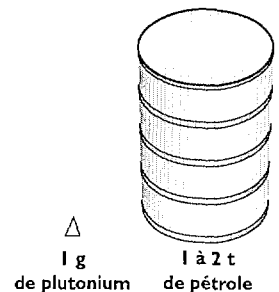


Cœur de réacteur

- applications développées grâce à la chaleur dégagée par le plutonium 238 : stimulateurs cardiaques, batteries utilisées à bord de satellites ou sondes spatiales,...
- utilisation comme matière fissile dans les réacteurs électronucléaires.

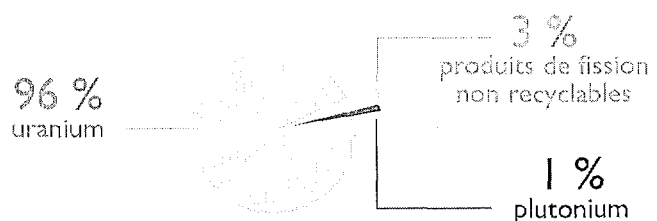
Une matière à haute valeur énergétique

Un gramme de plutonium 239 peut générer autant d'électricité qu'une à deux tonnes de pétrole. La formation du plutonium est une conséquence de la combustion de l'uranium dans tout réacteur nucléaire. Les deux principaux isotopes fissiles, le plutonium 239 et le plutonium 241, ont des propriétés analogues à celles de l'uranium 235 en ce qui concerne la fission qui est à l'origine de la production électronucléaire.



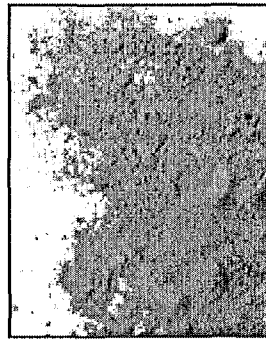
Deux étapes nécessaires pour valoriser le plutonium : traiter pour recycler

Le traitement permet la récupération des matières énergétiques contenues dans les combustibles usés (retirés du cœur du réacteur au bout de trois ans). Les constituants du combustible usé sont alors séparés comme suit :





Le plutonium ainsi récupéré lors des opérations de traitement est recyclé sous forme de combustible, appelé "**MOX**", mélange d'oxydes. Ce mélange est constitué de poudres d'oxyde d'uranium (93 à 95 %) et d'oxyde de plutonium (5 à 7 %). Ces poudres sont broyées et homogénéisées, puis pressées pour former des pastilles cylindriques. Ces pastilles sont ensuite frittées, puis introduites dans des tubes métalliques en alliage de zirconium pour former des "crayons combustibles". Enfin, ces crayons sont "assemblés" dans des structures métalliques : ce sont ces assemblages qui constituent le cœur du réacteur. Ce combustible remplace alors celui à base d'uranium enrichi.



Dioxyde de plutonium (PuO_2)

Le recyclage du plutonium présente des avantages importants

- L'utilisation du combustible MOX limite les quantités de plutonium produit par les centrales puisqu'un réacteur qui fonctionne avec 30 % de combustible MOX consomme autant de plutonium qu'il en produit. Elle contribue ainsi à l'effort de stabilisation des stocks de matières nucléaires.
- La réduction de la toxicité à long terme des déchets.
- D'importantes économies d'uranium enrichi.

Le MOX en Europe

Le combustible MOX est produit à l'échelle industrielle depuis plus de dix ans en Belgique, et plus récemment en Angleterre et en France.

Au 1^{er} septembre 2001, trente-cinq réacteurs en Europe dont vingt en France fonctionnaient avec du combustible MOX. En France, huit autres réacteurs sont techniquement prêts à utiliser ce combustible et d'ici quelques années, cinquante réacteurs en Europe devraient fonctionner avec du combustible MOX.

La période radioactive du plutonium

La radioactivité d'un élément est un phénomène de retour à l'équilibre. Par sa "désintégration nucléaire", il se transforme peu à peu en un nouvel élément stable. On appelle "période radioactive" ou "demi-vie" l'intervalle de temps à l'issue duquel la moitié des atomes d'un élément instable ont disparu.

La période radioactive des isotopes du plutonium est très variable :

Pu 236	2,85 ans
Pu 241	14,4 ans
Pu 238	87 ans
Pu 240	6 600 ans
Pu 239	24 110 ans
Pu 242	380 000 ans

Le nom originel du plutonium

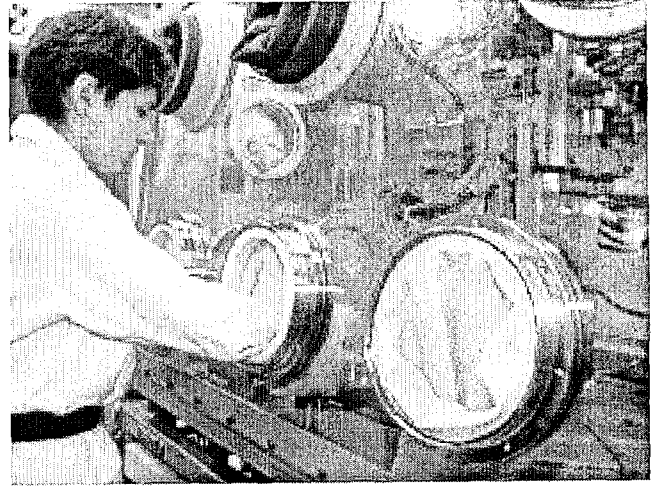
Par analogie avec l'uranium et le neptunium, découverts avant lui – et dont les noms doivent leur origine aux planètes Uranus et Neptune – le nom du plutonium, donné en 1942, fait référence à la planète Pluton, située au-delà d'Uranus dans notre système solaire.

La toxicité du plutonium

La toxicité du plutonium est essentiellement d'origine radiologique. Elle est due, selon les isotopes, aux émissions de particules α et de neutrons. Lorsque le plutonium pénètre dans l'organisme, sa radioactivité entraîne une irradiation des organes contaminés.

En cas d'accident, le plutonium peut être inhalé ou incorporé par une blessure. Dans ce cas, il passe dans le sang et se répartit dans les poumons, le foie et les os. En fonction de sa forme chimique (oxyde, nitrate...), le plutonium se fixe de façon plus ou moins durable sur ces organes avant d'être éliminé dans les urines.

La manipulation du plutonium s'effectue avec des mesures de sécurité draconiennes (boîtes à

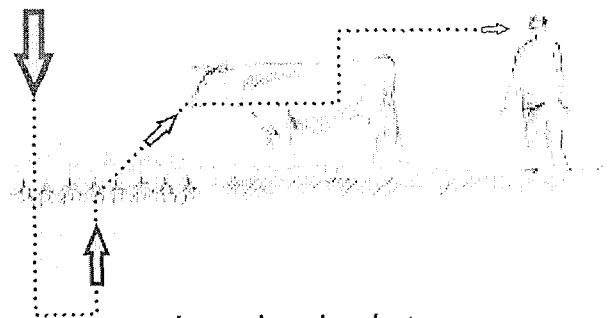


gants, enceintes étanches...), ce qui rend les contaminations internes hautement improbables. Chez l'homme, les études effectuées sur les rares personnes contaminées n'ont rien montré de significatif. Des maladies cancéreuses ont cependant été observées chez l'animal après incorporation de fortes doses de plutonium.

Une faible présence dans l'environnement

Le plutonium est un élément lourd. Sa dispersion dans l'atmosphère ou dans l'eau se fait difficilement. La principale source actuelle de présence de plutonium dans l'environnement est due aux retombées des essais des armes thermonucléaires menés avant 1973 (date de signature du traité interdisant les essais aériens), au retour inopiné sur terre de satellites porteurs de source d'énergie à base de plutonium et dans une beaucoup plus faible mesure, à l'industrie nucléaire. Une fois déposé sur le sol, le plutonium est peu transférable à la chaîne alimentaire, et l'homme est donc peu exposé à sa toxicité.

L'oxyde de plutonium est peu transférable dans la chaîne alimentaire



Les racines des plantes n'absorbent qu'un **millième** de l'oxyde de plutonium déposé sur le sol.

Le bœuf n'absorbe qu'un **millième** de l'activité contenue dans les plantes.

L'homme n'absorbe qu'un **millième** de l'activité contenue dans le bœuf.

PLUTONIUM (Pu)

WHAT IS PLUTONIUM?

Plutonium is a hard white metal that looks like iron. It melts at 640° Celsius, turns into plutonium oxide when exposed to air and can catch fire.

Plutonium is called a "radioelement" because it is radioactive. Like all other atoms, it consists of a nucleus (made of neutrons and protons) and electrons.

Since the plutonium nucleus has 94 protons, plutonium occupies the 94th position on the periodic chart of universal elements.

Though the plutonium nucleus always has 94 protons, the number of neutrons varies by isotope. There are fifteen plutonium isotopes, ranging from plutonium 232 (94 protons and 138 neutrons) to plutonium 246 (94 protons and 152 neutrons). The plutonium isotopes most widely used in the commercial nuclear industry are plutonium 239, 240 and 241.

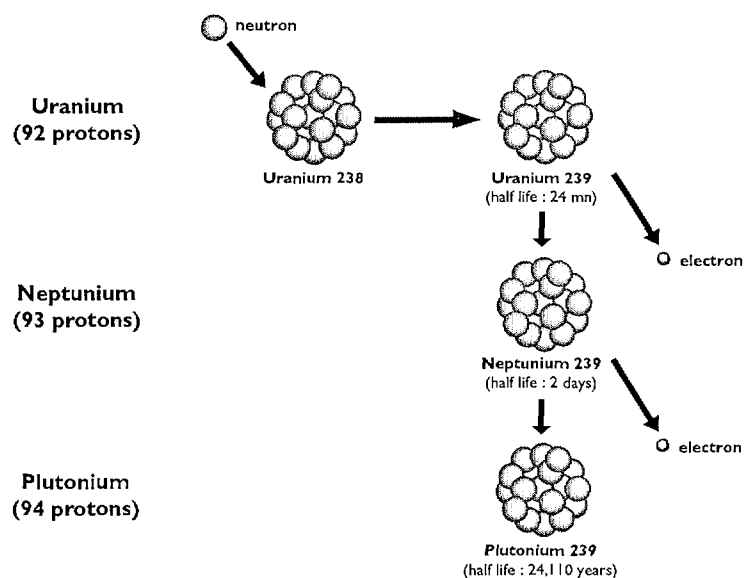
Due to excess material, the plutonium nucleus is unstable. Equilibrium is restored through a reaction that releases particles and emits rays. This reaction is called radioactivity.

Where does plutonium come from?

"**P**rimordial" plutonium 239 was formed during the creation of the universe. With a half life of 24,110 years, it is now long gone. Only plutonium 244, formed at the same time, remains in trace amounts due to its 83 million year half life. Today, infinitesimal quantities of plutonium are still forming naturally as cosmic rays strike uranium 238 in the earth's crust.

Most of the plutonium present on earth today was formed artificially. It is created through a nuclear reaction that converts uranium used in nuclear fuel. During the reaction, uranium 238 captures a neutron and transforms into uranium 239. The uranium 239 loses an electron in turn and transforms into neptunium 239. The neptunium 239 undergoes the same process, transforming into plutonium 239.

Formation of plutonium 239



Plutonium is separated from spent fuel waste in the form of a nitrate through a series of mechanical and chemical processing operations performed in a specialized facility. It is then converted into oxide (PuO₂).

A little history

In 1934, Irène and Frédéric Joliot-Curie (Nobel Prize 1935) demonstrated for the first time that radioelements could be created artificially. In December 1940, **Glenn Theodore Seaborg** (Nobel Prize 1951) and his team discovered plutonium by “bombarding” a uranium 238 target at the University of California at Berkeley.

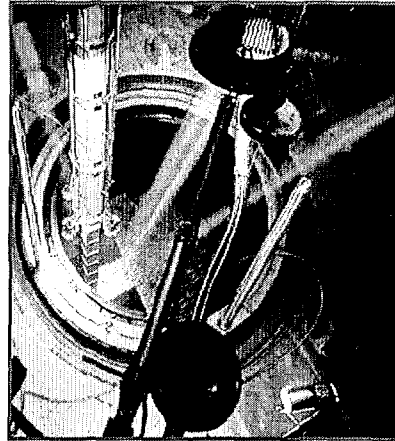


Glenn Theodore Seaborg

In 1941, Seaborg discovered plutonium 239, first used for military purposes with the development of the atomic bomb. Since then, research has focused on the peaceful uses of plutonium, such as electric power generation.

How is plutonium used?

There are 2 known commercial applications for plutonium:

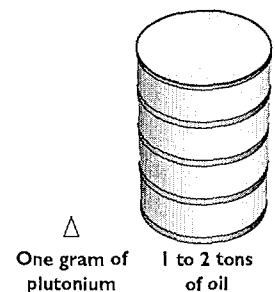


Core of a nuclear reactor

- pacemakers or satellite and space probe batteries, among other applications, make use of the heat released by plutonium 238;
- electric power generation by nuclear reactors, which make use of plutonium's fissile properties.

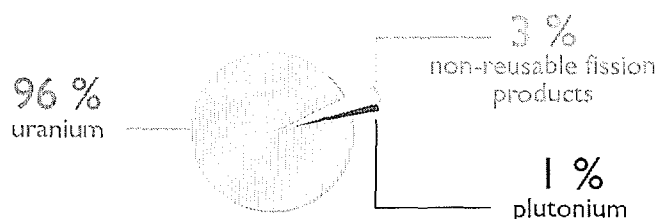
An energy-rich material

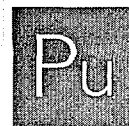
One gram of plutonium 239 can produce as much electricity as one to two tons of oil. All nuclear reactors produce plutonium in the process of “burning” uranium fuel. The main fissile isotopes of plutonium, plutonium 239 and plutonium 241, have fissile properties similar to uranium 235 used in nuclear power generation.



Capturing the value of plutonium through reprocessing and recycling

Spent fuel is removed from the reactor core after three years of residence and is **reprocessed** to recover the energy-rich materials it still contains. The spent fuel comprises:





After reprocessing, the recovered plutonium is recycled into mixed oxide fuel, or "**MOX**". The mixture consists of uranium oxide powder (93-95%) and plutonium oxide powder (5-7%).

The powders are crushed, blended and compacted to form cylindrical pellets. The pellets are sintered and loaded into zirconium alloy tubes called fuel rods.

The rods are bundled together into a metal structure, forming fuel assemblies. The reactor core, which comprises a number of such fuel assemblies can use fresh MOX fuel instead of enriched uranium fuel.



Plutonium dioxide (PuO₂)

Plutonium recycling offers major advantages

- A nuclear reactor with 30% MOX fuel consumes as much plutonium as it produces, helping to stabilize inventories of special nuclear materials by minimizing the amount of plutonium that nuclear power plants produce.
- By separating plutonium from spent fuel waste and reusing it, the long-term toxicity of final waste is reduced.
- Enriched uranium requirements are reduced, saving valuable natural resources for the future.

MOX in Europe

MOX fuel has been produced commercially in Belgium for over 10 years and is now also produced in the U.K. and France.

Thirty-five reactors were loaded with MOX fuel in Europe as of 1 September 2001, including twenty in France. Eight additional French reactors are technically ready for MOX and fifty European reactors should convert to MOX over the next few years.

Radioactive half life of plutonium

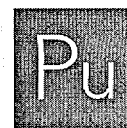
Radioactivity is produced when an element returns to equilibrium. An element gradually transforms into a stable element through a process of "radioactive decay". The "half life" is the time required for half of the atoms of an unstable element to disappear or decay.

Plutonium isotopes have a wide range of half lives:

Pu 236	2.85 years
Pu 241	14.4 years
Pu 238	87 years
Pu 240	6,600 years
Pu 239	24,110 years
Pu 242	380,000 years

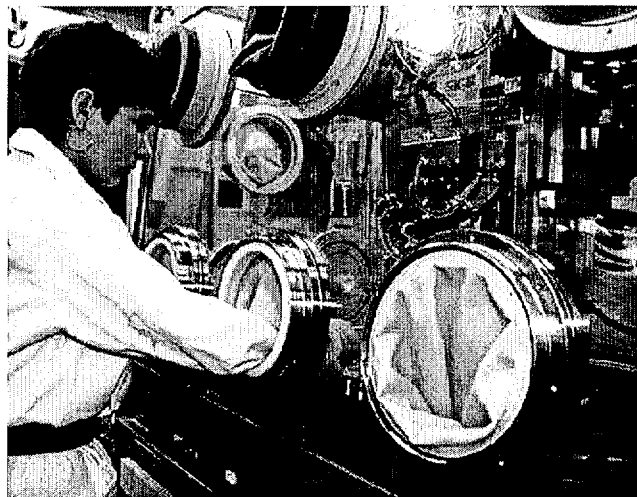
Origin of the name Plutonium

The elements uranium and neptunium, discovered before plutonium, owe their names to the planets Uranus and Neptune. By analogy, plutonium acquired its name in 1942 in reference to Pluto, a planet of our solar system located beyond Uranus.



Plutonium toxicity

The main source of plutonium toxicity is its radioactivity. Radioactivity is caused by the release of particles and neutrons, and it varies by isotope. When plutonium enters the body, it irradiates the internal organs. In an accident involving plutonium, the radioelement can be inhaled or ingested through a wound, enter the bloodstream and migrate to the lungs, liver and bones. Depending on its chemical form (oxide, nitrate), plutonium may remain in these organs for some time before being eliminated in the urine. Extreme safety measures are employed for plutonium handling (glove boxes, shielded cells, etc.), making internal contamination highly improbable.

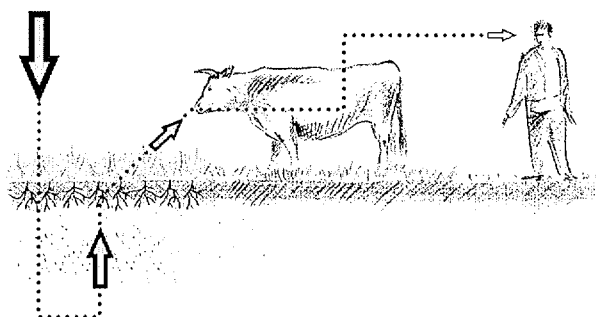


Very few people have ever been contaminated, and no significant side effects were observed during scientific studies of such cases. However, cancer has been observed in animals after ingestion of large doses of plutonium.

Limited plutonium presence in the environment

Plutonium is a heavy metal. It does not disperse easily in the air or in water. The presence of plutonium in the environment comes mostly from three sources: fallout from nuclear weapons testing conducted before 1973 (date of the treaty banning atmospheric testing), the return to earth of failed plutonium powered satellites and, to a much more limited extent, the commercial nuclear power industry. Once deposited on the ground, plutonium does not migrate easily into the food chain. Humans are therefore rarely exposed to its toxicity.

Plutonium oxide does not migrate easily into the food chain



Plant roots absorb only **one thousandth** of the plutonium deposited on the ground.

Cows absorb only **one thousandth** of the radioactivity contained in plants.

Humans absorb only **one thousandth** of the radioactivity contained in beef.