Jean-Marc TRUCHET

CENTRALES ELECTRONUCLEAIRES



DIFFERENTES FILIERES A FISSION

© Jean-Marc TRUCHET - 36 Pages
DOCUMENT ORGINEL D'OCTOBRE 2022 - ALL RIGHTS RESERVED WORLD WIDE
Version 1 du 15 mars 2025 - Version 2 du 1er août 2026

NOTES DE L'AUTEUR

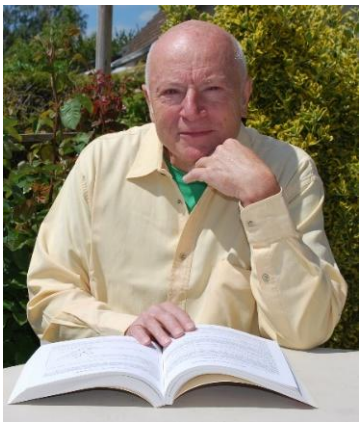
Ce document, très synthétique, est constitué à partir des propres connaissances de l'auteur, de ses voyages, de recherches à caractère historique, d'extraits de ses livres (Cf. site internet ci-dessous) comme d'analyses géostratégiques et géopolitiques, en particulier :

Consulter le site internet de l'auteur : **www.laplumedutemps.com**

Par ailleurs, il serait vain de rechercher ou d'estimer dans le texte ci-dessous, un quelconque parti pris pour telle ou telle organisation, pour tel ou tel gouvernement, pour telle ou telle entreprise ou telle ou telle personne. Il ne transcrit que des événements connus et vérifiables.

Suivant la loi en vigueur, des extraits limités sont autorisés sous réserve d'en préciser la source, soit : **Jean-Marc TRUCHET** et le titre de l'œuvre correspondante.
Pour une utilisation plus importante, quel que soit le moyen, une demande écrite est nécessaire en précisant le motif et en utilisant l'onglet **CONTACT** du site internet.

Pour tous nos ouvrages comme pour tous nos articles, nous sommes toujours réceptif aux remarques, compléments, informations vérifiées et vérifiables, témoignages et autres documents susceptibles d'enrichir nos recherches et nos écrits. Naturellement, sous réserve que ces éléments soient constructifs… Pas les autres… Par avance, merci !



Jean-Marc TRUCHET
Ancien ingénieur de l'énergie électrothermique et électronucléaire civiles
Ancien chef d'entreprise
Auteur autoédité depuis 1982

CONFERENCIER

Site internet : www.laplumedutemps.com
Chaine : **YOUTUBE LAPLUMEDUTEMPS**

LA PLUME DU TEMPS®

Iconographie : Jean-Marc TRUCHET et mentions particulières
Page de couverture : Les réfrigérants atmosphériques de la centrale électronucléaire REP de Cruas-Meysse (Département de l'Ardèche - France)

SOMMAIRE

	Pages
NOTES DE L'AUTEUR	2
REMERCIEMENTS	4
SIGNIFICATION DES PRINCIPAUX TERMES UTILISES	5
PREAMBULE	6
L'ENERGIE NUCLEAIRE	7
L'uranium	7
Extraction du sol	7
Principaux producteurs dans le monde	7
Les mines en France	8
Dans le monde	8
Traitement local sur site minier	9
Le radon	10
L'ATOME	10
L'URANIUM NATUREL	11
LES RAYONNEMENTS NUCLEAIRES ISSUS DE PRODUITS DE FISSION	12
REACTIONS NUCLEAIRES	12
La divergence	13
La section efficace	13
La masse critique	13
Décroissance radioactive d'un réacteur nucléaire	14
LES REACTEURS NATURELS	15
Les eaux radioactives naturelles et artificielles	15
LA RADIOPROECTION	18
Irradiation et débit de dose	18
Système international	18
Conséquences médicales	19
NATURE DE L'IRRADIATION	19
La contamination externe	19
La contamination interne	19
Protection contre la radioactivité et la contamination	19
Mesure des rayonnements ionisants et de la contamination	20
Situation pour les centrales électronucléaires en France et pour la population	
LES ORGANISMES DE SURETE	22
En France	22
International - L'AIEA	23
UNE CENTRALE ELECTRONUCLEAIRE	24
DIFFERENTES FILIERES NUCLEAIRES INDUSTRIELLES	25
Les réacteurs à fission à uranium naturel	25
En France - Filière UNGG	25
En Ex-URSS - Filière RBMK	26
Au Canada - Filière CANDU	27
REACTEURS NUCLEAIRES A URANIUM ENRICHI	29
Filières à eau pressurisée	29
USA-France - Réacteurs PWR/REP	29
Réacteurs VVER	30
Petite centrale VVER russe flottante	32
Réacteurs BWR	33
AUTRE FILIERES	34
Réacteurs à thorium	34
Réacteurs à boulets	34
DOCUMENTATION PERTINENTE	36

REMERCIEMENTS



A **Elena SYDOROVA** (Елена Сидорова) qui nous aide si souvent dans nos diverses recherches, en particulier par l'acquisition en Russie de documents originaux et leurs droits de reproduction.
Directrice de l'**INSTITUT FRANCO-RUSSE** (IFR). Université Polytechnique d'Etat du Sud de la Russie, M.I Platov (UPESR) située à Novotcherkassk - Oblast de Rostov sur le Don (Russie).
Site internet : www.institutfrancorusse.org

Docteur ès Sciences Techniques, titulaire des palmes académiques françaises (Université de Tarbes - France).
Vice-Directrice de l'Institut de Formation internationale.
Maître de Conférences au département : ÉQUIPEMENTS ET TECHNOLOGIES PETROLIERS ET GAZIERS à l'Université M. I. Platov.
Responsable du Programme francophone.
Membre de l'Association : AVENIR DE LA LANGUE FRANÇAISE.

Pour les sociétés d'état **ROSATOM** et **POCATOM** pour les documents transmis qui permirent d'apporter de nombreux détails peu connus en Occident, ce qui facilita grandement l'auteur pour rédiger cette étude mais également pour l'illustrer.

**

TOUS LES LIVRES ET TOUTES LES ETUDES DE L'AUTEUR SONT EN LIBRE ACCES DEPUIS LE SITE INTERNET : www.laplumedutemps.com

SIGNIFICATION DES PRINCIPAUX TERMES UTILISES

- REP : Réacteur à Eau Pressurisée. Il s'agit de la filière américaine Westinghouse, *Pressurised Water Reactor*, acquise en 1972 par la France et depuis francisée. La filière russe VVER (Водо-Водяной Энергетический Реактор, *Vodo-Vodianoï Energuetitcheski Reaktor)* est basée sur un principe similaire. Pour mémoire, les filières de Tchernobyl et de Fukushima n'ont strictement rien à voir avec les filières REP française et VVER russe.
- Nouvelle génération de réacteur REP, un peu plus puissant, dénommé EPR, soit : European Pressurized Reactor, désormais renommé Evolutionary Power Reactor.
- La durée calculée des unités REP françaises est de 60 années de fonctionnement pleine puissance, durée incluant les arrêts pour rechargement et entretien.
- Une tranche électronucléaire correspond à un ensemble composé d'un réacteur et d'un Groupe Turbo-Alternateur (GTA). Une centrale électronucléaire peut ainsi être composée de n tranches, telle à Gravelines dans le Nord de la France qui comporte 6 tranches.
- Le couplage au réseau général HT ou THT (Haute ou Très Haute Tension) consiste à fermer le disjoncteur qui se situe entre ce dernier et l'alternateur de la tranche concernée via le transformateur MT-HT.
  Pour cela, tension et fréquence doivent être parfaitement identiques. La montée en puissance de l'unité électronucléaire ou autres, peut alors s'effectuer par ouverture progressive des vannes d'admission vapeur de la turbine mais sa vitesse de rotation devient alors imposée par la fréquence du réseau général, soit 50 Hz.
- CP0, CP1, CP2, P4 et P'4 puis N4 signifient Contrat Programme de construction des centrales électronucléaires REP. Pour le CP0 il n'y a que les deux tranches 905 MW bruts de Fessenheim, définitivement arrêtées en février et juin 2020 et les quatre de Bugey (2 à 5) toujours en fonctionnement.
- 1 MW = 1000 kW. 1 MW/h = 1 MW durant 1 heure. Idem pour le kW et le kW/h.
- Les tranches du CP1 affichent une puissance brute de 905 MW, celles de tranches du CP2 de 910 MW par modifications des corps basse pression (BP) de la turbine.
- La différence entre puissance brute et puissance nette provient de la consommation des auxiliaires internes de chaque tranche, soit environ 4.5% de la puissance brute. Ainsi une tranche de 905 MW bruts affiche ≈ 865 MW nets sur le réseau électrique et une de 910 MW, soit ≈ 870 MW nets.
- PPE, Programmation Pluriannuelle de l'Energie, le N°1 ayant été signé en 2020 par le gouvernement avec la participation des écologistes. Le PPE 3 sera publié le 13 février 2026.
- L'eau lourde a même masse physique que l'eau ordinaire (H_2O) mais les deux atomes d'hydrogène sont des isotopes, soit ^2H (Deutérium) par suite d'un neutron de plus dans le noyau. Couramment, l'eau dite lourde, est identifiée sous forme D_2O. A l'état naturel, il en existe une petite partie dans l'eau dite légère : l'eau ordinaire. Sa présence n'offre aucune conséquence particulière pour la santé humaine mais ses conséquences sont différentes en physique nucléaire où elle est exploitée à la fois comme modérateur et comme fluide caloporteur dans certains types de réacteurs.

**

PREAMBULE

Découverte par le monde civil après l'explosion des deux bombes atomiques à Hiroshima le 06 août 1945 puis le 09 août suivant à Nagasaki, l'énergie atomique a poursuivi deux voies, soit l'une dans le domaine militaire jusqu'aux bombes thermonucléaires, l'autre dans le domaine civil via des réacteurs de différentes filières.
Toutefois, les premières applications furent toujours basées sur la fission des atomes et essentiellement destinées à fournir du plutonium pour les bombes. Il s'agissait de réacteurs à uranium naturel refroidis par un gaz inerte ou de l'eau, ordinaire ou lourde (D_2O), la chaleur dégagée étant récupérée pour produire de l'électricité ou non.
Dès 1951, les Russes utilisèrent ce type de filière puis une autre totalement différente pour produire de la vapeur d'eau à haute température et haute pression pour entraîner un groupe turboalternateur et ainsi produire de l'électricité.
Quant à la France, la première centrale sera construite au bord de la Loire et couplée au réseau le 14 juin 1963. Il s'agit de CHINON A1 (Ex EDF-1) d'une puissance électrique de 68 MW, une unité équipée d'un réacteur à uranium naturel refroidi au gaz carbonique mais produisant aussi du plutonium (^{239}Pu) pour la force de frappe comme tous les réacteurs de ce type.
Depuis, les puissances ont considérablement augmenté et d'autres filières sont en cours de développement ou déjà exploitées à travers le monde comme les réacteurs à thorium (^{232}Th) ou à boulets.
Ainsi, ce document se propose de décrire ces principales filières.

NOTE IMPORTANTE
L'énergie nucléaire étant entrée dans le monde actuel par deux actions militaires très meurtrières, il serait regrettable de juger ce document différemment de son objectif premier, à savoir : informatif afin de mieux comprendre l'usage civil qui est fait de l'énergie atomique, particulièrement en matière de centrales de production d'énergie électrique.
En effet, sans toutefois idéaliser les choses, si néanmoins l'on veut mieux appréhender leur fonctionnement, il est évidemment nécessaire, d'une manière toujours didactique, d'ouvrir le champ des connaissances afin de permettre des jugements pertinents et non de se contenter d'approximations, parfois non dénuées de parti-pris, voire d'intérêts divers.

**

L'ENERGIE NUCLEAIRE

L'URANIUM

Sa découverte par le chimiste allemand Martin Enrich KLAPROTH date de 1789. Ne sachant pas de quoi il s'agissait, il en proposa Urane ou Uranite en référence à la planète Uranus qui venait d'être découverte par Willam Herschel. Ce métal dont le minerai s'appelle la pechblende, prit son nom définitif d'Uranium en 1790.
Il fallut attendre 1841 pour que Melchior PELIGOT[1] isole le métal sous forme d'oxyde (UO_2) puis le 28 février 1896, Henri Bequerel[2] en constate l'effet de la radioactivité par les conséquences induite sur une plaque photographique de cette époque posée là pour un autre usage.
Ensuite, dès 1898 Pierre et Marie CURIE isoleront le Polonium et le Radium.[3]
Naturellement, s'ensuivront d'autres découvertes…

EXTRACTION DU SOL

L'uranium est relativement abondant dans la nature puisqu'il représente le 48è élément, autrement dit, partout et plus que l'or et l'argent. On le rencontre sous forme plus ou moins concentrée dans les terrains granitiques comme la Bretagne, dans certains reliefs tels que le Massif central et les terrains sédimentaires mais sa concentration étant très faible, il est inexploitable.

PRINCIPAUX PRODUCTEURS DANS LE MONDE EN 2023/2024

KAZAKSTHAN ≈ 40 %
CANADA ≈ 15 %
AUSTRALIE ≈ 9 %
OUZBEKISTAN ≈ 7 %
RUSSIE ≈ 5 %
NIGER ≈ 4 %
CHINE ≈ 3 % - AUTRES…

Certains pays, comme la Russie, exploitent essentiellement l'uranium pour leurs propres besoins, ce qui ne les empêchent pas de disposer d'importantes réserves. Est-il étonnant de constater que certains de ces pays comme le Niger ou le Kazakhstan font face à des conflits récurrents ?



Mine d'uranium d'Arlit au Niger (Photo. Sté. Orano)

1 Eugène Melchior PELIGOT (24.02.1811 - 15.04.1890) est un chimiste français.

2 Henri BEQUEREL (15.12.1852 - 25.08.1908) est un physicien français, prix Nobel de physique en 1903 mais dont l'attribution fut donnée par moitié à Pierre et Marie CURIE.

3 Marie CURIE (7.11.1867 - 4.07.1934) est polonaise d'origine, de son vrai nom Maria Solomoa SKLODOWSKA. Elle est physicienne et reçoit en 1911 le prix Nobel de chimie. Précédemment, elle avait reçu avec son mari Pierre CURIE, 50 % du prix Nobel accordé à Henri BEQUEREL (Cf. ci-dessus).
Pierre CURIE (15 mai 1859 - 19 avril 1906) est un physicien français.

LES MINES EN FRANCE[4] (IRSN)

Qu'elles soient à ciel ouvert ou souterraines, depuis la fin du second conflit mondial elles ont intéressé 27 départements pour 250 sites d'extraction.
On retrouve essentiellement ici la Bretagne, la Vendée et le Massif central dont 8 sites furent équipés d'usines de traitement du minerai pour une teneur moyenne de 1 kg/tonnes de roche ce qui conduisit à la production de 2 000 t de d'uranium.
Le reste qui représente évidemment la plus grande partie, sera laissé sur place sous forme de stériles, contenant quelques grammes d'uranium à quelques centaines de grammes au plus par tonne de roche.

DANS LE MONDE

La teneur exploitée varie d'environ 0.8 à 5 % d'uranium sachant que l'on rencontre parfois des teneurs plus élevées. A cela, s'ajoutent d'autres minéraux exploitables occasionnellement rencontrés (Or, argent, pierres, etc.). Cependant, il est très important de retenir que seul, l'uranium de masse atomique 235 est radioactif à concurrence d'une teneur de 0.7202 %, le reste étant de l'uranium de masse atomique 238, interne et dénommé fissile.[5]
Suivant cela, seul le ^{235}U est dénommé fissile car émetteur de neutrons susceptible de réagir avec le milieu environnant et naturellement, avec d'autres atomes d'uranium. Quant au 238U, il est considéré comme un déchet ce qui représentait en France en 2025, 350 000 t et dans le monde 5 millions de tonnes, soit respectivement 18 325 m^3 et 261 780 m^3. Pour mémoire, la densité de l'uranium est 19.1 et celle du plomb *"seulement"* 11.35 !..

Exemple

Mine à 3% produira 30 kg d'uranium par tonne de roche, soit : 8.4 kg ^{235}U (Fissile) et 21.6 kg ^{238}U (Fertile).

Toutefois, deux usages en sont néanmoins faits :

- Dans le domaine militaire des obus flèche, utilisés contre les véhicules blindés (Chars…) car bénéficiant d'une grande inertie, à l'impact l'énergie cinétique se transforme en énergie thermique qui fait fondre le métal.
- Dans le domaine de l'énergie électronucléaire des réacteurs à fission appelés surgénérateurs ou rapides (SUPER PHENIX, en France). Dans cette filière, le cœur est composé d'assemblages contenant du plutonium (^{239}Pu) à concurrence d'environ 25 % en volume, le reste étant placé en couverture périphérique ne contenant que du ^{238}U. Sous le bombardement neutronique du plutonium, l'uranium fertile se transforme en plutonium avec un rendement énergétique final >1, d'où le nom de surgénérateur.
  Malheureusement, en France cette filière très prometteuse sera abandonnée pour raisons politiques en juin 1997.[6]



Obus flèche sans et avec étui de propulsion (Poudre). Photo. J-PP

4 Suivant l'IRSN (Institut de Radioprotection et de Sureté Nucléaire) qui fusionna avec l'ASN (Autorité de Sureté Nucléaire) le 1er janvier 2025 pour donner l'ASNR (Autorité de Sureté Nucléaire et de Radioprotection) .

5 Suivant l'écriture normalisée ISO, il convient de noter ^{235}U et ^{238}U.

6 Voir la vidéo N°24 sur la chaine youtube : **@laplumedutemps.com** mais également ci-dessous le chapitre consacré à cette filière.

TRAITEMENT LOCAL SUR SITE MINIER

Une première concentration sous forme d'oxyde d'uranium (Etat naturel) en ^{235}U et en ^{238}U permettant l'expédition vers l'usine d'enrichissement sera pratiquée comme suit :

1 Broyage des pierres uranifères.
2 Traitement chimique par lixiviation dynamique ou statique.

3. Mise sous forme d'un gâteau (Nom réel également appelé *"yellow cake"*). Il s'agit alors d'un concentré d'oxyde de ^{235}U et de ^{238}U vers 85 %.
4. Chauffage à 800°C pour élimination des produits résiduels indésirables.
5. Transport vers l'usine de purification, soit Tricastin (Département de la Drôme et Malvési dans le département de l'Aude). Cette purification à l'état gazeux, appelée conversion, s'effectue en deux étapes, soit :
   a. Tétrafluorure d'uranium (UF4).
   b. Hexafluorure d'uranium (UF6).

Intervient alors le procédé de séparation isotopique par diffusion gazeuse ou par ultracentrifugation, cette dernière étant uniquement pratiquée en France. Il s'agit ici d'utiliser la faible différence de densité entre le ^{235}U et le ^{238}U, soit 1.26 % pour que ce dernier se trouve centrifugé sur la paroi de l'appareil. Toutefois, ce procédé est long et réclame des milliers de centrifugeuses à très haute vitesse de rotation.

PREMIER SCHEMA

Dans un réacteur à uranium naturel comme celui de Bugey 1 ou de St. Laurent A1 et A2, l'usine d'enrichissement en ^{235}U n'est pas nécessaire car l'émission de neutrons émise est suffisante pour atteindre la criticité puis à contrôler la puissance du réacteur. Toutefois, ceci nécessite de grosses installations, d'où en particulier, les dimensions du réacteur.

PREMIER SCHEMA - APPLICATION CIVILE

Le combustible nucléaire est constitué de ^{235}U fissile à raison de 0.7202 %, le reste en ^{238}U fertile. Ce type d'installation est dite plutonigène par transmutation du ^{238}U en ^{239}Pu sous l'action du bombardement neutronique et du temps laissé pour cette réaction.

DEUXIEME SCHEMA

Enrichissement en ^{235}U pour cœurs de réacteur de type REP, BWR, CANDU ou RBMK (Russie)

SEPARATION ISOTOPIQUE (Voie chimique)

Concentration en ^{239}Pu issu des réacteurs plutonigènes pour utilisation dans un réacteur à neutrons rapides (Réacteur surgénérateur) dans lequel le cœur est composé à environ 25 % de ^{239}Pu et le ^{238}U disposé en périphérie. Sous l'action du bombardement neutronique du ^{239}PU, il y a transmutation du ^{238}U (Inerte) en ^{239}Pu avec un coefficient énergétique >1 (D'où le nom de surgénérateur).
Plus précisément, le ^{239}PU est obtenu par émission de neutrons depuis le ^{235}U (Fissile) vers le ^{238}U (Fertile). Le plutonium nécessite deux désintégrations β^- successives, soit :

$$n + {}^{238}U \rightarrow {}^{239}U \rightarrow {}^{239}Np^{7} \rightarrow {}^{239}Pu$$

7 NP = Neptunium dont la période radioactive du ^{239}NP est de 2.35 jours (Demi-vie).

Enrichissement >90% en ^{235}U (Bombe A d'Hiroshima) ou en ^{239}Pu > 90% (Bombes A d'essai d'Alamogordo aux USA puis sur Nagasaki au Japon). Réacteurs de bateaux (Civils et militaires) et de sous-marins.

Période radioactive

Egalement appelée demi-vie, il s'agit de la durée à échéance de laquelle le produit a perdu 50 % de son activité radioactive et ainsi de suite. Na pas confondre avec la décroissance radioactive totale du produit ! La période radioactive du ^{235}U étant de 703.8 millions d'années, c'est ce qui explique qu'il reste encore possible de faire fonctionner des réacteurs nucléaires et malheureusement d'avoir la possibilité de fabriquer des bombes atomiques. Cela signifie aussi que pour le développement de la vie, surtout des mammifères, il fut nécessaire que la radioactivité de la Terre décroisse suffisamment.

A tire d'exemple :

^{235}U ➡ 703.8 millions d'années.
^{239}Pu ➡ 24 000 années
^{131}I ➡ 8 jours (Iode 131)
^{16}N ➡ 7.3 secondes (Azote 16)

LE RADON (SYMBOLE Rn)

Ce chapitre est proposé à titre documentaire car il s'agit d'un sujet régulièrement évoqué à travers des expressions comme *"les maisons qui rendent malades, voire qui tuent"*. Des constats qui incriminent généralement le radon, un gaz inodore, invisible, incolore et à peu près partout présent dans la nature mais à très faible concentration, surtout dans les zones uranifères.
Le radon comporte de nombreux isotopes, autrement dit, des atomes ayant même numéro atomique mais dont ne noyau de présente pas le même nombre de neutrons.
Parmi ceux-ci, le ^{222}Rn est le plus stable mais le plus radioactif et dont la période est de 3.8 jours. Il est issu de la désintégration du ^{226}Ra (Radium) qui lui-même provient du ^{235}U ou du ^{235}Th (Thorium).
Dans un environnement confiné, cela peut conduire à une concentration à terme dommageable pour les mammifères dont évidemment l'être humain. Il s'agit alors en premier lieu, d'une contamination des voies respiratoires.
Il existe au moins deux sources d'émission, soit :

- Par le sol (Failles naturelles, galeries de mines, écoulement d'eau, carburants fossiles…).
- Par tout ou partie de la structure du bâtiment (Briques, parpaings, ciment…).

En cas de doute, il convient d'en rechercher ladite source à l'aide d'un appareil approprié puis le débit de dose. Ensuite, d'isoler celle-ci (Sole béton sur film plastique ou autres), élimination des constituants incriminés (Parpaings, briques, terres pour les maisons en torchis…). Naturellement, ceux-ci ne peuvent être mis en décharge commune mais faire l'objet d'un traitement particulier conduisant à leur isolement en décharges classées.

L'ATOME

Sans aborder de choses compliquées, pour mémoire, il convient néanmoins de rappeler ce qui suit, facilitant une meilleure compréhension ultérieure :

Le noyau d'un atome

Il est constitué de neutrons, électriquement neutres et de protons, positifs. L'ensemble constituant le nucléon, soit : neutrons + protons.

Les électrons

Gravitant autour du noyau, les électrons en nombre égal à celui des protons, sont constitués d'énergie pure et de charge conventionnellement négative.

L'atome

Suivant ce qui précède et dans une organisation idéale, l'atome est donc neutre et stable.

Un ion

Correspond tout simplement à un atome qui a perdu ou gagné des électrons. Si cela constitue un nuage, il s'agit alors d'un plasma, tel le soleil.

Le nombre de masse

Il s'agit de la somme arithmétique des neutrons et des protons. Pour ^{238}U, il s'agira 92 protons + 146 neutrons = 238, écrit en exposant devant le symbole de l'élément en question.

La masse atomique

Tout simplement la masse de la molécule, celle-ci étant ou non composée de n atomes.

Le numéro atomique

Egalement appelé nombre de charge, il s'agit du nombre de protons écrit en indice devant le symbole de l'élément à identifier. Par exemple, pour ^{238}U : $_{92}U$ (92 protons).

Un isotope

Il s'agit d'un atome comportant plus de neutrons que de protons. Les propriétés chimiques sont identiques à celle de l'atome originel mais pas les propriétés physiques.
Exemple, l'oxygène qui comporte trois isotopes, soit : ^{16}O, ^{17}O et ^{18}O., 16O étant contenu dans l'air atmosphérique à ≈99%, les deux autres n'empêchant personne de vivre…[8]

Durée de vie des isotopes

Stables ou instables (Radioactifs), leur durée de vie est très variable à l'échelle humaine.[9]
C'est d'ailleurs grâce à eux que l'on a pu obtenir une bonne appréciation du climat depuis l'origine de la Terre et mieux comprendre son évolution comparative par rapport au réchauffement actuel de l'atmosphère terrestre.[10]

L'URANIUM NATUREL

Composé de ^{235}U et de ^{238}U comme ci-dessus exposé, le ^{235}U est naturellement instable car émetteur de neutrons, d'où sa décroissance radioactive dans le temps, ce qui va induire trois sortes de réactions nucléaires, à savoir :

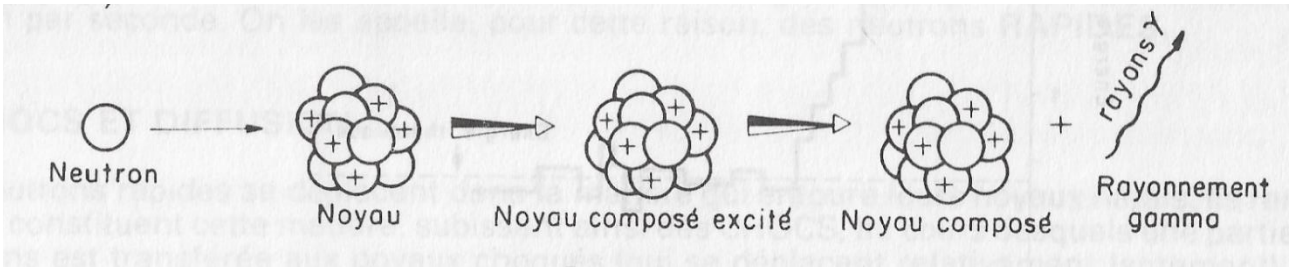
- Une réaction de type élastique dans laquelle le neutron cède une partie de son énergie cinétique au noyau avec émission d'énergie thermique, provoquant ainsi son ralentissement. C'est ce qui est recherché dans un réacteur.
- Une capture radiative sans éclatement du noyau mais provoquant une émission gamma (Energie pure).

---

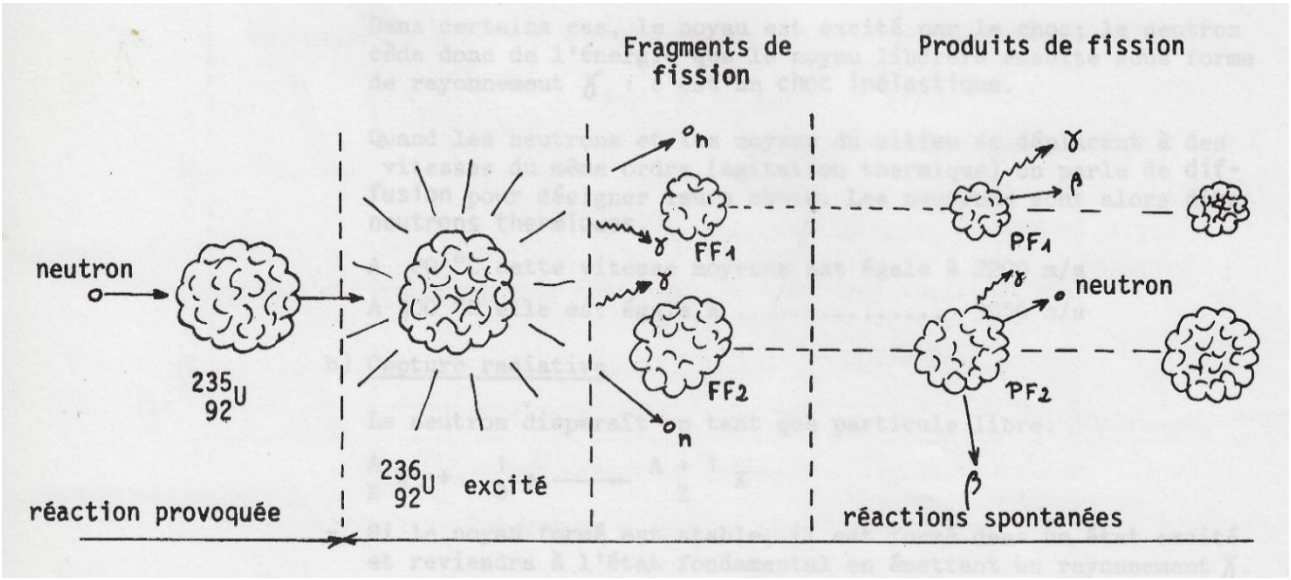
8 Soit 20.7 % dans l'air atmosphérique.

9 Consulter : **ISOTOPES - CE QU'IL FAUT RETENIR** (Sté. ORANO).
STADE ISOTOPIQUE DE L'OXYGENE (Wikipédia).

10 Consulter les vidéos concernant le climat sur la chaine **youtube laplumedutemps.com**



- Une réaction de fission par éclatement du noyau avec émission de très nombreux produits de fission (PF) par nature instables à vie plus ou moins longue et de neutrons.



Ainsi, on définit deux types de neutrons :

- Neutrons, dits lents également appelés thermiques dont la vitesse < 5 km/s
- Neutrons, dits rapides dont la vitesse < 20 km/s

Ceci ne doit pas être confondu avec la distance parcourue et pas plus avec la pénétration dans la matière

LES RAYONNEMENTS NUCLEAIRES ISSUS DES PRODUITS DE FISSION

On rencontre quatre types de rayonnement ionisants, soit :

α Particule lourde fortement ionisante, très peu pénétrante mais constituant la majorité des contaminations de surface ou interne. Il s'agit de la plus dangereuse.

ß Il s'agit de protons, ionisants et pénétrants par nature mais sans contamination de surface.

γ Rayonnement pur, peu ionisant mais très pénétrant. Pas de contamination de surface. Il s'apparente au rayonnement X et à certaines ondes radio de courte fréquence.

η Très énergétique, peu sensible à l'air, pénétrant mais non contaminant.

LES REACTIONS NUCLEAIRES

Le ^{235}U, le ^{238} U et le ^{239}Pu utilisés en centrales nucléaires, sont des oxydes, soit UO_2 et PuO_2. Seuls, leurs atomes produisent l'énergie thermiques.

Pour maintenir une réaction nucléaire stabilisée, seuls, 40 % des neutrons émis sont utilisés.

La divergence

Il s'agit d'un point où la multiplication des neutrons devient exponentielle. Deux possibilités se présentent alors :

- Il s'agit d'un réacteur nucléaire (Centrale électronucléaire, par exemple) au sein duquel cette multiplication est contrôlée à tous niveaux de puissance.
- Il s'agit d'une arme nucléaire à fission (Bombe A) pour laquelle cette croissance n'est pas contrôlée mais contenue le plus longtemps possible de manière à produire un effet maximum. L'explosion survint alors en quelques dixièmes de seconde.

La section efficace

La densité de l'eau à 40°C est de 1 mais de ≈ 0.75 à 300°C (Enceinte sous pression).
On imagine alors facilement que dans un réacteur de type REP (Réacteur à Eau sous Pression), il y aura moins de collisions avec les atomes des molécules d'eau (H_2O) que dans le cas de l'eau à 40°C. Autrement dit, cette montée en température induit un effet stabilisant pour les réactions nucléaires.

La masse critique

Il s'agit de la masse uniforme de ^{235}U comme de ^{239}Pu à partir de laquelle il y a divergence spontanée puis explosion, à savoir :

- Pour le ^{235}U hautement enrichi à > 95 %, elle est de 25 kg ce qui correspond sensiblement à une sphère de 7.8 cm de diamètre, soit un orange.
- Pour le ^{239}Pu hautement enrichi à > 95 %, la masse critique uniforme n'est que de 4 kg, soit une sphère d'environ 4.2 cm de diamètre ce qui correspond sensiblement à une mandarine.

Pour mémoire, la densité de l'un comme de l'autre est voisine, soit 19.1. On constate immédiatement que pour une arme atomique à fission (Bombe A), les quantités en jeu peuvent être relativement limité pour déjà parvenir à un effet destructeur non négligeable. Naturellement, la charge nucléaire se présente en plusieurs parties de manière à éviter toute criticité. Elles ne sont précipitées ensemble qu'au moment opportun et maintenue le plus longtemps possible (Quelques dixièmes de seconde).

Chaleur résiduelle d'un réacteur

Lors de l'arrêt d'un réacteur nucléaire, la puissance thermique ne disparaît pas instantanément comme celle d'une flamme puis se stabilise à 1%.

QUESTION…

Combien de ^{235}U consomme un réacteur REP de 1 370 MW à Pn (Pleine puissance) pour 300 jours par année à pleine puissance sachant que sa puissance thermique est de ≈ 4 100 MW ?
Cela représente environ 0.394 kg, soit pour 300 jours par années à Pn, ≈ 118 kg… Consommation naturellement à multiplier par le nombre de tranches de cette puissance et les autres suivant leurs caractéristiques. Le total est alors loin d'être négligeable ce qui implique un approvisionnement national important.
En uniformisant cette valeur à l'ensemble des tranches électronucléaires du parc REP en France, soit : 905, 910, 1370, 1385 et 1450 MW bruts, ce conduit à 54 tranches x 118 = 6 372 kg d'uranium métal. Si maintenant, on admet que cet uranium provient de mines à 2.5 %, soit 25 kg par tonne de minerai, la quantité de roche à considérer s'établit à 254 880 tonnes.
Toutefois, il ne s'agit que d'uranium naturel ne contenant que 0.7202 % de ^{235}U fissile. Or, il est nécessaire de l'enrichir à 3.5 % ce qui implique alors un volume de minerai en conséquence, soit une différence de 3.5000-0.7202 = 3.42798 %, arrondi à 3.43 %.

Le volume de roche à considérer s'établit alors à 1 213 883 tonnes, ceci chaque année et encore ne s'agit-il que d'un simple exemple minimum. On comprend alors tout de suite que l'approvisionnement de la France constitue un enjeu crucial et que la perte des mines du Niger se traduise par un renchérissement du minerai et d'importantes difficultés.[11]

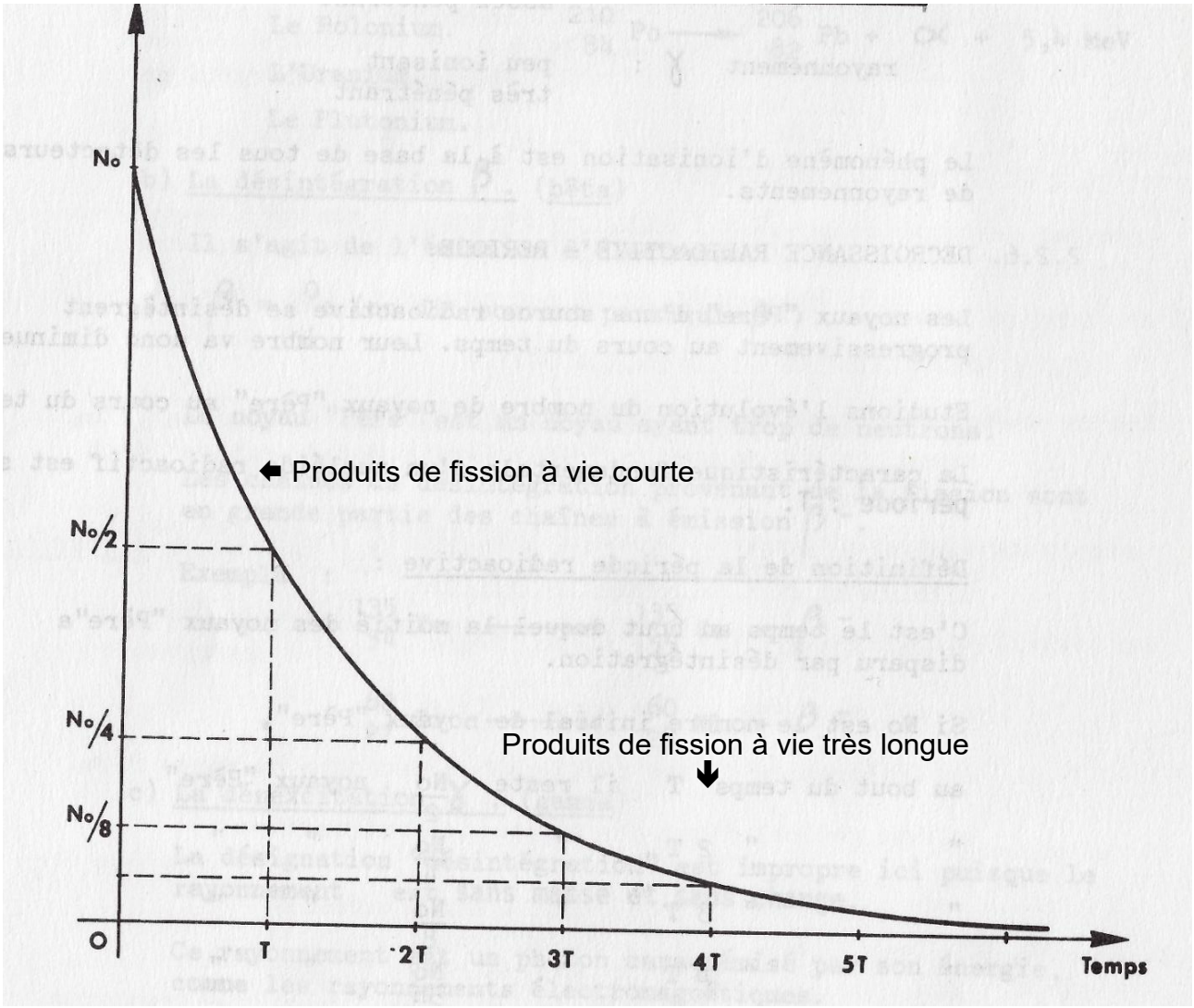
Décroissance radioactive d'un réacteur électronucléaire

L'arrêt d'un réacteur nucléaire à fission, quelle que soit la filière (REP, BWR, VVER, etc), est provoqué par la chute des grappes composées de bore et d'acier inoxydable. Toutefois, s'il devient ainsi sous-critique, ce n'est pas pour autant que les produits de fission (PF) disparaissent instantanément mais suivant une décroissance suivant leur activité. Autrement, les premiers à perdre leur puissance thermique sont ceux à vie courte mais pas ceux à vie longue ce qui se traduit par la courbe ci-dessous jusqu'à une asymptote qui correspond à 1% de la puissance thermique à Pn (Puissance nominale), soit environ 1 h après l'arrêt du réacteur.

Par conséquent, ceci nécessité un refroidissement sécurisé permanent.

Par exemple, pour une unité de 1370 MW bruts dont le rendement thermodynamique est de ≈35 %, cela signifie ≈ 3 915 MWth, soit 39.15 MWth à évacuer en permanence.

Pour cela, différentes dispositions redondantes sont prévues et secourues si nécessaire.



11 Voir : **@laplumedutemps.com**. Vidéo N°26 : **COMMENT LA FRANCE A PERDU L'AFRIQUE DE L'OUEST**. Si les guerres du pétrole existent bien, il semble que celles pour l'uranium existent également.

DES REACTEURS NATURELS…

La nature a tout créé et nous n'avons souvent que copié…
En 1972, à l'usine de Pierrelatte (Département de la Drôme), l'analyse d'un lot de minerai d'uranium, une teneur en ^{235}U de 0.7171 % au lieu de la teneur actuelle de 0.7202 %. Il ne sera évidemment pas difficile d'en déterminer la provenance, soit la mine d'Oklo, près de Franceville au Gabon. D'autres lots afficheront même une teneur nettement inférieure, soit jusqu'à 0.29 %.
L'étude montrera que 16 réacteurs naturels ont fonctionné depuis près de 2 milliards d'année pour une consommation estimée de 7 tonnes de ^{235}U ($366m^3$).

Un fonctionnement naturel

A cette époque, la concentration en ^{235}U était voisine de 3.8 % ce qui pouvait atteindre localement le seuil de criticité (Réaction en chaîne) et ainsi entraîner un début de multiplication neutronique, entraînant à son tour l'élévation de la température de l'eau qui servait alors de modérateur.
Consécutivement, la section efficace augmentait aussi ce qui entraînait le ralentissement de la réaction en chaine. Il n'y avait donc pas explosion…
Puis l'eau se refroidissait mais intervenait également une augmentation de produits de fission dont ^{135}Xe (Xénon) qui est très neutrophage et dont la période radioactive est de 9.2 heures.
Par conséquent, même si la section efficace diminuait, cela ne pouvait pas entraîner la reprise de la réaction en chaine tant que le xénon n'avait pas suffisamment diminué.
Puis, à terme, la réaction nucléaire pouvait petit à petit redémarrer, faire chauffer l'eau, augmenter la section efficace, conduire au ralentissement du flux neutronique et à l'apparition du ^{135}Xe qui étouffait toute criticité et ainsi de suite…
Dans la mesure où ce type de réacteur naturel existait à Oklo, on peut penser qu'il en existe d'autres dans certaines zones uranifères.
Dans une vidéo de l'auteur sur la chaine @laplumedutemps.com, un exposé sera proposé concernant l'évènement survenu dans la Tougouska, la Sibérie orientale en Russie, le 30 juin 1908 à 7 h 14 locale. Une affaire jamais réellement élucidée depuis, au moins hors de Russie, qui vit plusieurs milliers de km² de forêts rasées sans que l'on ne retrouve jamais de cratère du supposé bolide qui les aurait percutées ou survolées… L'Occident ne représentant qu'une petite partie de la surface de la Terre, que savons-nous de l'avancement à cette époque d'éventuels travaux de certains physiciens russes travaillant sur l'énergie atomique ? Une question qui mérite d'être explorée.

Les eaux radioactives naturelles et artificielles

Ce qui précède pourrait d'ailleurs être rapproché des publicités pour des eaux radioactives qui furent courantes entre les deux guerres mondiales. On utilisait souvent pour cela le radium 226 et 228 (^{226}Ra et ^{228}Ra). Ce type de remède était sensé guérir de nombreuses maladie ou se protéger d'elles comme d'assurer une vieillesse en *"bonne santé"*.
Toutefois, il existe également ce type d'eau à l'état naturel mais généralement très peu radioactives.
L'eau contient naturellement des éléments radioactifs dont une partie provient des terrains qu'elle traverse. Ces éléments vont donc se retrouver dans les nappes phréatiques et les rivières.



Photo. Wikipedia.

Les eaux minérales puisées dans des terrains granitiques peuvent contenir du potassium 40, du radon ou de l'uranium dissous et sont ainsi naturellement plus radioactives que les eaux de surface.

L'eau de mer est également naturellement radioactive car elle contient notamment du tritium, du polonium, de l'uranium, etc. que l'on retrouve en particulier dans les poissons, coquillages ou les crustacés. Radioactivité naturelle, voire artificielle issue des retombées radioactives de tous les essais nucléaires, en particulier atmosphériques qui ont été pratiqués jusque dans les années 1980. A cela s'est ajouté les catastrophes de Tchernobyl et de Fukushima comme d'autres incidents de moindre gravité qui eurent lieu dans les temps passés.

De nos jours, après dilution dans le milieu, tant les rejets ariens que liquides consécutifs à l'industrie électronucléaire ne sont guère mesurables aussi bien dans l'air que dans les eaux car très faibles.

On notera que depuis 1996, l'immersion de déchets en mer est interdite par le protocole de Londres signé en 1996 puis ratifié en 2006 par 30 pays incluant la France et que cette dernière n'immerge plus de déchets depuis 1969.

Un habitant de la France reçoit au total une dose annuelle moyenne de radioactivité de l'ordre de 3,7 millisieverts par an. Toutefois, ceci doit être pondéré en fonction du lieu car il est évident que les terrains granitiques sont plus émetteurs ce qui conduit à noter que près des deux tiers de l'exposition totale sont inhérents à la radioactivité naturelle, à savoir : inhalation de radon (Cf. ci-dessus, soit environ 38 % de l'exposition totale, rayonnement émis par le sol qui représente ≈ 14 %, rayonnement cosmique pour ≈ 8 %) et ingestion d'éléments radioactifs naturels (uranium, radium, potassium, etc.) présents dans les aliments et dans l'eau à concurrence de ≈ 6 %. Naturellement, à cela s'ajoutent les examens radiographiques, le rayonnement X des soudures à l'arc électrique, etc.

Pour mémoire, la surveillance constante de l'environnement est assurée par l'ASNR (Autorité de Sureté Nucléaire et de Radioprotection).[12]

Conséquences pour les professionnels

La dose prise pour un aller Paris New York en Concorde s'élevait à 6μSv pour un vol a 15 km d'altitude. En conséquence et hormis toutes autres raisons, le personnel de bord était médicalement suivi ce qui est toujours le cas aujourd'hui pour les vols subsoniques. C'est évidemment pareil pour les cosmonautes pour lesquels les doses reçues sont évidemment plus importantes (Débit de dose et temps passé).

Il en est de même pour l'ensemble du corps médical ayant rapport avec des rayonnements ionisants comme les personnels de certaines imagerie médicale (Radiologie…), de radiothérapie, etc.

L'activité industrielle civile

Il faut, de bonne grace ou non, cependant reconnaître qu'au moins depuis la fin du second conflit mondial, l'énergie nucléaire civile a fait infiniment moins de victimes que l'avion et le transport routier. A tel point que depuis 1946, l'on compte qu'à minima 650 000 morst sur les routes françaises sans compter tous les blessés plus ou moins gravement. Le rythme actuel se situe encore entre 3 000 et 3 500 chaque année, soit une petite ville… Il s'agit ici d'une énorme conséquence pour la société, à la fois humaine, sociale et financière.

Une société comme EDF (Electricité de France) ne déplore aucune victime au sein de son personnel depuis le début d'activité de l'énergie électronucléaire en 1963.

12 Pour mémoire, l'IRSN et l'ASN ont fusionnée au 1er janvier 2025 pour donner l'ASNR (Autorité de Sureté Nucléaire et de Radioprotection).

L'activité militaire

On note que durant la grande période des essais atomiques dans l'atmospohère, soit jusque durant l'année 1963, il n'était pas rare de pouvoir impressionner une pellicule photographique au somment de la Tour Eiffel mais on peut supposer qu'il en était de même au niveau des toitures…[13]

Pour la petite histoire…

Une expérience plus ou moins connue, consista à couper un tibia d'une dame de 84 ans puis à l'appliquer sur une plaque photographique qui fut rapidement impressionnée en devenant blanche ce qui donne tout de suite le niveau d'activité !

Que les âmes sensibles se rassurent tout de même…, Elle avait donné son corps à la science, évidemment après son décès… Tout de même !



Même le sol de charmants lieux de villégiature comme les pierres de cette ancienne bâtisse visible en fond, peuvent s'avérer émetteur d'un certain débit de radioactivité naturelle sans pour cela porter atteinte à la vie. Photo. J-MT.

**

13 Traité d'interdiction des essais atomiques dans l'atmosphère signé à Moscou le 5 août 1963. Toutefois, compte tenu du faible rendement de ce type d'explosion, les particules micronisées de ^{235}U, de ^{239}U et tous leurs produits de fission, retomberont de très nombreuses années après sur le sol et sans doute encore aujourd'hui mais désormais à une échelle peu mesurable.

LA RADIOPROTECTION

Il s'agit évidemment ici d'une simple information. Son objet n'est pas de sombrer dans l'inquiétude ce qui n'est vraiment pas l'objet de ce chapitre mais simplement d'apporter des éléments d'appréciation conduisant in fine, à mieux comprendre les effets et les conséquences de rayonnements ionisants. Partant de là, comment assurer la protection des biens et des personnes.
Comme il est ci-dessus indiqué, de très nombreuses sources naturelles ou artificielles émettent des rayonnements ionisants, tels que les rayons cosmiques, les divers écrans, etc.

NE PAS CONFONDRE…
Irradiation et contamination, ce n'est pas pareil et les effets souvent fort différents.

1. IRRADIATION ET DEBIT DE DOSE

Une notion tout à fait similaire à la puissance et à la quantité d'énergie, cette dernière étant égale à la première multipliée par le temps.

SYSTEME INTERNATIONAL

A. L'unité d'irradiation est le Becquerel (Bq). Il correspond au nombre de désintégrations par seconde. Anciennement, il s'agissait du Curie, soit 1 Ci = $3.7.10^{10}$ Bq.

B. L'unité de débit de dose est le Gray par seconde (Gy/s) ou dans la pratique, le Gray par heure, Gy/h. Anciennement, on parlait du rad/h, soit 1 Gy = 1J/kg = 100 rad.
Ceci correspond à la dose absorbée par la matière.

C. Dose équivalente et efficace. Elle s'exprime en Sievert (Sv) et permet d'évaluer l'impact des rayonnements ionisants de différente nature sur la matière vivante dans son ensemble car les différents organes ne présentent pas la même sensibilité (Gonades, glandes endocriniennes, moëlle épinière, etc.).
On parlait autrefois du REM (Röntgen Equivalent Men), soit 1 REM = 0.01 Sv).

CONSEQUENCES MEDICALES

Elles sont par nature variables pour un même débit de dose suivant la durée dans laquelle celui-ci est reçu. Elles peuvent ainsi aller de préoccupantes à limitées, voire faibles et même sans effet notable pour un temps long.

Radioactivité naturelle moyenne en France

Ainsi, En France, la radioactivité naturelle moyenne est-elle évaluée à 2.5 mSv/an ce qui correspond à un débit de dose de 0.3 µSv/h. Naturellement, elle peut s'avérer nettement plus élevée suivant les lieux, en particulier comportant des roches granitiques (Bretagne, Massif central…)

Radioactivité naturelle tolérable en France

Elle est cette fois de 2.5 µSv/h ce qui correspond à une dose de 17.5 mSv

NATURE DE L'IRRADIATION

Le rayonnement gamma (γ) correspond à de l'énergie pure, similaire au rayonnement X.

Ses effets sont similaires à l'irradiation neutrons.
Les conséquences dépendent de de dose reçue et du temps d'exposition.
Suivant les constats établis après Hiroshima, Nagasaki et autres situations incidentelles dans le monde et sans traitement médical, on constate ce qui suit :

- 0.25 Sv : effets temporaires sur la composition sanguine, voire la moelle épinière.
- 0.5 Sv : conséquences aux gonades avec stérilité temporaire.
- 1 Sv : vomissements, nausées, grande fatigue, perte des cheveux.
- 3 Sv : importante affection de la peau, stérilité définitive des ovaires, hémorragies et infections, cécité.
- 5 Sv : anémie générale, ulcérations intestinales, mort à terme plus ou moins long.
- 10 Sv : idem ci-dessus avec effets plus importants et mort à terme.
- 30 Sv : convulsions et mort dans les heures suivantes.

Si l'on peut s'inquiéter de telles données, il convient tout de même de rappeler que 0.25 Sv correspond déjà à 25 REM dans l'ancienne mesure et 5 Sv à 500 REM, soit des doses très élevées, appliquées dans un temps très court et sans qu'aucun traitement ultérieur ne fut appliqué.

2. LA CONTAMINATION EXTERNE

Il s'agit ici du dépôt de particules lourdes de type α sur une surface mais il peut aussi s'agir de poussières. Sue le corps, celles-ci sont éliminées par simple lavage soigneux, y compris dans les plis, sous les ongles, etc. Cette élimination est normalement aisée.

Recueillement des fluides contaminés

Naturellement, on notera que d'une lanière générale, tous les fluides issus de la décontamination radioactive de biens comme de personnes, ne sont jamais rejetés dans la nature mais soigneusement recueillis et isolés. Ils font ensuite l'objet d'une microfiltration puis les filtres traités en conséquence suivant leur degré d'activité radioactive.

3. LA CONTAMINATION INTERNE

Toujours issues de particules α ou de poussières radioactives, c'est la plus dangereuse car elle intéresse en premier les voies respiratoires, voire digestives. Leurs effets vont ainsi en priorité affecter les poumons, le squelette, la thyroïde et la moelle épinière, provoquant ainsi une irradiation constante. L'élimination, au moins partielle, s'effectue par forte hydratation et une médication contenant de grosses molécules dont l'action consiste à piéger les particules radioactives puis les éliminer par les voies naturelles.

4. PROTECTION CONTRE LA RADIOACTIVITE ET LA CONTAMINATION

Pour mémoire :

α Particules lourdes issus de produits de fission. Très peu pénétrantes, soit quelques centimètres dans l'air et aisément arrêtées, d'où l'utilisation de tenues vestimentaires adaptées au milieu fréquenté, y compris si nécessaire de dispositifs respiratoires afin d'éviter toute contamination interne (Gants, coiffe, masque respiratoire, tenues complète étanche avec bouteilles d'air comprimé, etc.).

β Emission d'électrons pouvant affecter plusieurs mètres dans l'environnement. Ionisants mais pas contaminants, arrêtés par une feuille d'aluminium peu épaisse.

γ Energie pure proche du rayonnement X et de certaines ondes radio de courte fréquence.

Le rayonnement gamma traverse plusieurs mètres d'air atmosphérique et nécessite des dispositions adaptées pour être arrêté, telles que : mur en béton, mur de briques de plomb, tôle d'acier, etc.

- Le rayonnement neutron est très énergétique et peu ralenti par l'air. Comme le rayonnement γ, il est pénétrant pour les organismes vivants. Suivant sa puissance, la protection fait appel aux mêmes dispositions.

On observera que tant la source que sa puissance doivent être identifiées et les protections adaptées en conséquence. Ensuite, de telles situations ne se rencontrent pas dans la nature mais suite à un accident ou un incident en milieu industriel ou malheureusement en cas d'explosion(s) nucléaire(s).



Centrale du Bugey (Département de l'Ain - France), soit une tranche UNGG de 550 MW en cours de démantèlement et 4 tranches REP de 905 MW en exploitation, soit Bugey 1 à 5. Photo. J-MT

MESURE DES RAYONNEMENT IONISANTS ET DE LA CONTAMINATION

Irradiation

La mesure des rayonnements ionisants s'effectue couramment à l'aide d'appareils basés sur le principe Geiger-Müller qui est constitué d'un tube muni d'une anode et d'une cathode sous haute tension dans un gaz à faible pression, tel l'hélium ou de néon. Toutefois, ce type de matériel ne mesure pas le flux neutron.[14] Ce dernier est généralement comptabilisé à l'aide d'un film dosimètre sensible aux rayonnements rencontrés.

[14] Principe proposé en 1913 par Hans Geiger et Wlather Muller en 1928.

Contamination atmosphérique

La mesure s'effectue à l'aide d'un appareil de type aspirateur, il s'agit ici de recueillir les poussières de l'atmosphère sur un filtre puis d'en mesurer à la fois le débit de dose et la quantité sur une surface définie durant un temps déterminé. La mesure s'effectue également en continu de manière à assurer une surveillance permanente.

SITUATION POUR LES CENTRALES ELECTRONUCLEAIRES EN FRANCE ET POUR LA POPULATION

La limite de sécurité est de 20 mSv par année pour les travailleurs en centrales nucléaires et de 1 mSv par année pour les populations, valeurs extrêmement basses.
Concernant les INB (Installations Nucléaires de Base - Centrales électronucléaires), une réglementation très stricte est contrôlée par l'ASNR. Celle-ci peut être consultée sur son site ainsi que les doses effectivement rejetées.

**

LES ORGANISMES DE SURETE

EN FRANCE

L'Autorité de Sureté Nucléaire (ASN)

L'ASN assure au nom de l'état français le contrôle de la sureté nucléaire et de la radioprotection pour protéger les personnes et l'environnement.
En particulier, c'est l'ASN qui donne l'autorisation pour la divergence d'un réacteur lorsque toutes les opérations nécessaires ont été réalisées et approuvées par elle (Cf. site internet).

L'Institut de Radioprotection et de Sureté Nucléaire (IRSN)

L'IRSN est un établissement public à caractère industriel et commercial (EPIC), expert public en matière de recherche et d'expertise sur les risques nucléaires et radiologiques (Cf. site internet).

Domaine d'activité

Le champ de compétences de l'IRSN couvre l'ensemble des risques liés aux rayonnements ionisants, utilisés dans l'industrie ou la médecine ou encore les rayonnements naturels. Il exerce ses missions d'expertise et de recherche dans les domaines suivants :

- Surveillance radiologique de l'environnement et intervention en situation d'urgence radiologique.
- Radioprotection de l'homme.
- Prévention des accidents majeurs dans les installations nucléaires.
- Sûreté des réacteurs.
- Sûreté des usines, des laboratoires, des transports et des déchets.
- Expertise nucléaire de défense.

Les activités de recherche de l'IRSN, réalisées le plus souvent dans le cadre de programmes internationaux**,** lui permettent de maintenir et de développer son expertise et d'asseoir sa stature internationale de spécialiste des risques dans ses domaines de compétence, soit :

- La sûreté nucléaire.
- La sûreté des transports de matières radioactives et fissiles.
- La protection de l'homme et de l'environnement contre les rayonnements ionisants.
- La protection et le contrôle des matières nucléaires.
- La protection des installations nucléaires et des transports de matières radioactives et fissiles contre les actes de malveillance.

Niveaux de sureté

Suite à l'accident de la centrale RBMK de Tchernobyl en 1986, une échelle de gravité utilisée au plan international fut mise en pratique dès 1991. Elle permet immédiatement d'identifier le niveau de risque et permet ainsi d'informer la population comme les médias.[15]

[15] Cette échelle de gravité ne doit pas être confondue avec les dispositions propres à l'exploitation d'une unité électronucléaire comme indiqué à l'alinéa : **Mesures technique de sureté** qui concernent les dispositions prises, par exemple, suivant l'indisponibilité partielle pour une raison ou pour une autre, de tel ou tel matériel. Une situation qui peut éventuellement entraîner une réduction de puissance du GTA et ainsi du réacteur, voire un arrêt dans la mesure où le matériel ne serait pas remis en service suivant un délai défini dans les consignes de conduite.

Cette échelle est connue sous le sigle INES (International Nuclear Event Scale) et comporte 8 niveaux comme indiqué ci-dessous :

7 - Accident majeur.
6 - Accident grave.
5 - Accident entraînant un risque hors du site de l'installation.
4 – Accident n'entraînant pas de risque important hors du site de l'installation.
3 – Incident grave
2 – Incident
1 – Anomalie
0 - Ecart (Par rapport aux niveaux de consigne de fonctionnement de l'installation)

A ce jour, seuls deux événements ont été classés au niveau 7, soit l'accident du réacteur RBMK N°4 de la centrale de Tchernobyl le 26 avril 1986 en Ukraine et celui de la centrale de Fukushima Daiichi, filière BWR en mars 2011 au Japon.

Fusion ASN/IRSN

Issue de la relance d'un programme électronucléaire en France à travers la construction de 6 EPR (Evolutionary Power Reactor), une nouvelle loi datée du 21 mai 2024 définit l'organisation de la sûreté nucléaire et de la radioprotection.
Il est ainsi annoncé qu'au 1er janvier 2025 les activités de l'ASN et de l'IRSN seront fusionnées dans une nouvelle entité nommée ASNR (Autorité de Sureté Nucléaire et de Radioprotection). Son statut sera celui d'une autorité indépendante, interlocuteur unique, indépendant du gouvernement et des exploitants.[16]

INTERNATIONAL - L'AIEA (Agence Internationale de l'Energie Atomique)

L'origine date de l'assemblée générale des Nations Unies (ONU) du 24 janvier 1946 où sur proposition des puissances occidentales il fut décidé d'organiser un contrôle de l'énergie nucléaire comme en ce qui concerne la réduction des armements de ce type.
Lors de l'AG de l'ONU le 8 décembre 1953, le président américain Dwight Eisenhower, proposa la création d'une Agence Internationale qui serait chargée de l'utilisation et du contrôle des matières nucléaires.
Les statuts de l'AIEA seront approuvés le 23 octobre 1956 par 91 Etats et le siège en fut décidé à Vienne en Autriche.
Le début d'activité de l'AIEA date de 1957 et en 2020 la Russie se joignit à l'organisation portant le nombre d'adhérents à 171 membres pour 193 à l'ONU

Rôle de l'AIEA

En premier lieu, il consiste à vérifier qu'un usage fiable et pacifique est bien pratiqué concernant les technologies liées à l'énergie nucléaire comme au respect des traités de non-prolifération des armements et leur limitation (TNP…).
Dans ce cadre et en particulier, elle assure les fonctions suivantes :

- L'inspection des installations existantes pour s'assurer de leur usage pacifique.
- L'information comme les publications de normes pour la stabilité et la sûreté des installations nucléaires.
- Des liens et des contacts pour la recherche d'applications pacifiques.

Pour mémoire, à la demande de la Russie, les inspecteurs de l'AIEA sont en permanence sur les sites des centrales électronucléaires de Zaporijjia et de Kourchatov (Koursk).[17]

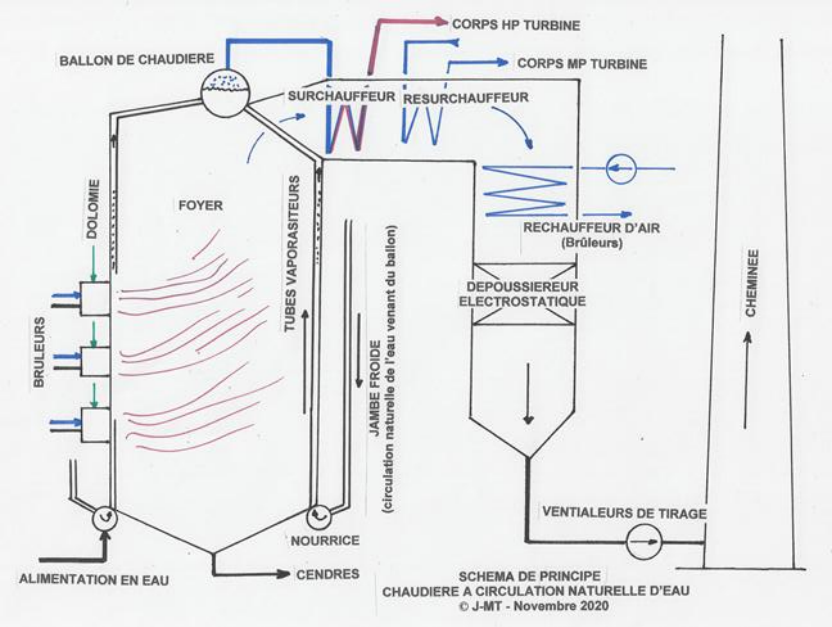
---

16 Consulter le site, Vie publique, sur internet pour plus de détails.

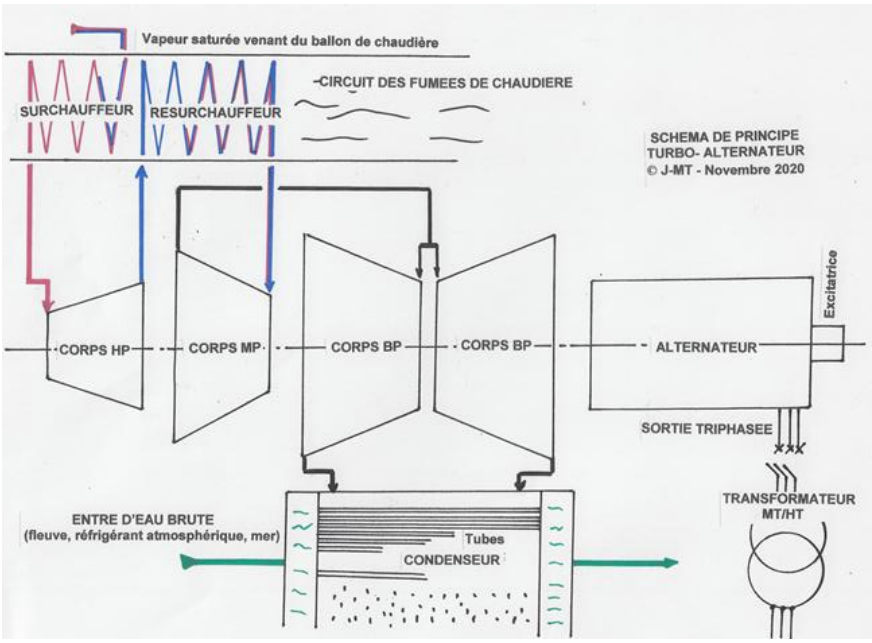
17 Observons qu'Israël, qui qui est une puissance nucléaire suivant son stock de bombes et le centre de recherche de Dimona dans le désert du Néguev, a toujours refusé les inspections de l'AIEA.

UNE CENTRALE ELECTRONUCLEAIRE

Dans son principe, une centrale électronucléaire, quelle que soit la filière, n'est autre qu'une centrale thermique dans laquelle la chaudière et ses accessoires furent remplacés par un réacteur nucléaire à fission ce qui constitue la partie primaire (Le réacteur et ses auxiliaires) et la partie secondaire (Le groupe turboalternateur et ses auxiliaires).
Seule, la partie primaire contient les éléments susceptibles d'émettre des radioéléments (Radioactivité). C'est pourquoi elle se trouve dans un bâtiment à la fois étanche et résistant à la pression de vapeur d'eau émise en cas de rupture brutale d'une tuyauterie du réacteur. Toutefois, pour les filières de type bouillant (Voir ci-après) le bâtiment contenant la partie secondaire est étanche car en cas d'incident (Gaine de réacteur, par exemple), la turbine et ses accessoires peuvent être contaminés. Ce type de filière, financièrement plus économique mais moins sécurisant, n'existe pas en France. Les filières nucléaires ci-dessous décrites font toutes appel à la fission des atomes, c'est-à-dire à l'éclatement du noyau d'uranium ou de plutonium.



Principe d'une chaudière de centrale thermique à flamme (Fuel, charbon, gaz).



Principe d'un groupe turboalternateur d'une centrale thermique à flamme ou électronucléaire.

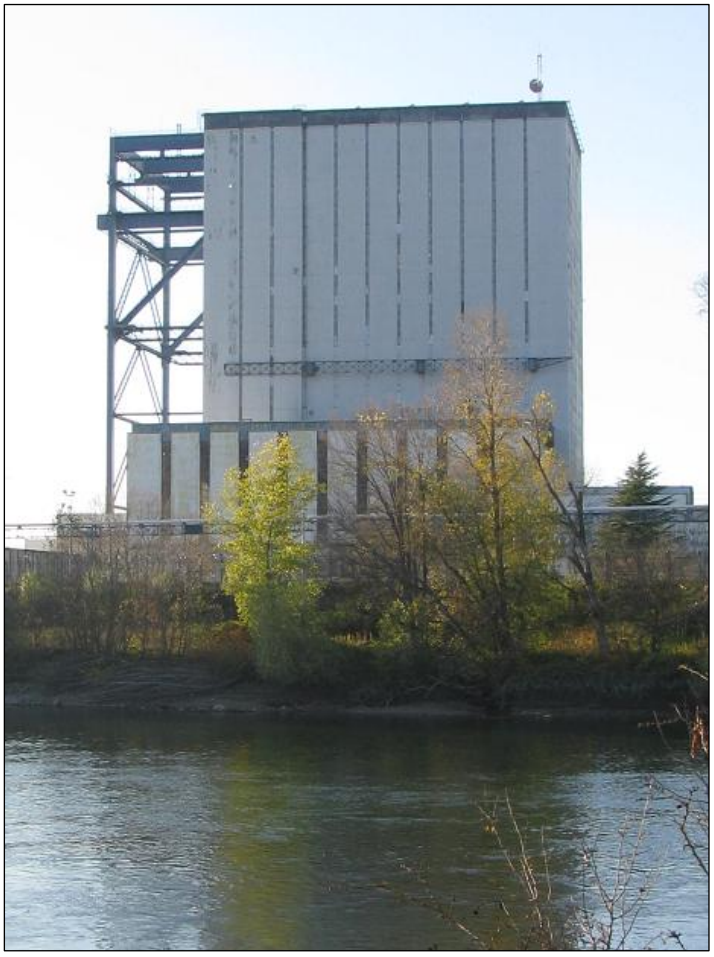
DIFFERENTES FILIERES NUCLEAIRES INDUSTRIELLES

LES REACTEURS A FISSON A URANIUM NATUREL

Il s'agit de réacteurs dans lesquels le ^{235}U n'est pas enrichi ce qui nécessite des constructions assez importantes telles qu'en France, Chinon A1 à Chinon A3, Saint Laurent des Eaux A1 - A2 et Bugey 1. Ces réacteurs sont dits plutonigènes par le fait qu'ils produisent du ^{239}Pu destiné à l'origine pour les premiers réacteurs à un usage militaire (Bombes A).
Ce fut en particulier le cas pour Marcoule G1 à G3 construits et gérés par le CEA, réacteurs à uranium naturel, refroidis par du CO_2.

En France - Filière UNGG

Ces réacteurs sont appelés UNGG pour Uranium Naturel Graphite Gaz.
Le modérateur est le graphite et le refroidissement assuré par du dioxyde de carbone (CO_2) sous pression mis en vitesse par de puissantes turbosoufflantes.
Des échangeurs de chaleur CO_2/eau placés dans le caisson étanche du réacteur alimentent en vapeur d'eau le groupe turboalternateur (GTA).
A partir d'une certaine taille, ces réacteurs sont caractérisés par des difficultés de stabilité du flux suite de possibles oscillations par empoisonnement $^{135}Xe \rightarrow ^{136}Xe$ (Xénon) [18] qui en limite la puissance mais également par un coefficient positif de température (Voir ci-dessous la filière RBMK).



Ces centrales présentent cependant trois avantages, comme le rechargement du réacteur en continu, l'absence d'usine d'enrichissement du combustible, au moins à l'origine et une certaine facilité d'exploitation (Conduite de l'installation).

Caractéristiques de Bugey 1
Pression effective de CO_2 : 41 b
Débit de CO_2 : 320 t/h
4 soufflantes de 20 MW chacune.
Caractéristiques de vapeur à l'arrivée turbine : 377 °C et 33 bars.
Le rechargement en combustible nucléaire peut s'effectuer en continu (Il ne nécessite pas l'arrêt du réacteur).

Centrale UNGG de Bugey 1 - Département de l'Ain (France). L'ensemble réacteur/échangeur de chaleur CO_2/Eau/Vapeur est contenu dans un grand caisson étanche constitué de béton armée et précontraint, résistant à la pression de service du CO_2.
D'une puissance de 540 MW, elle fut couplée au réseau en 1972 et définitivement arrêtée en 1994 après 22 années de fonctionnement. Cette unité est toujours en cours de démantèlement qui devrait se poursuivre jusqu'en 2030. Photo. J-MT

[18] Le xénon 135 (^{135}Xe) est un gaz très neutrophage (Absorbeur de neutrons).

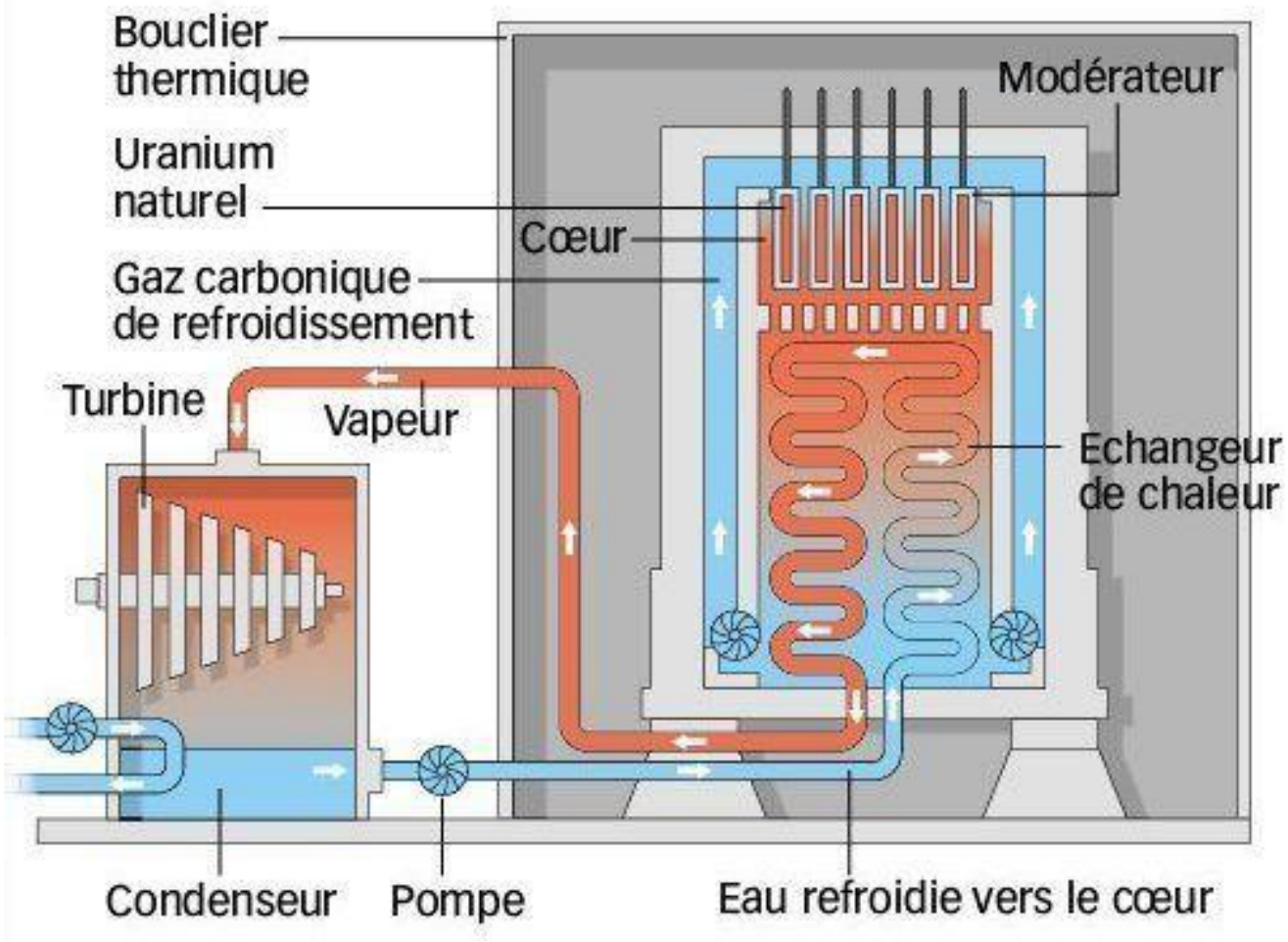


Schéma de principe d'un réacteur UNGG. Dessin via internet : la voix du nucléaire.

En ex-URSS - Filière RBMK

La première centrale électronucléaire au monde fut construite à Obninsk. Au code de APS-1, les travaux de cette unité de 30 MW thermiques et de 5 MW électrique commencèrent le 1er janvier 1950. Elle fut couplée au réseau le 26 juin 1954 et préfigurait les réacteurs de type RBMK avec une charge du réacteur en ^{235}U à 5%. Cette petite unité restera opérationnelle jusqu'au 29 avril 2002 puis deviendra un musée.

Du même principe que la filière UNGG, les réacteurs de grande puissance de type RBMK (Реактор Большой Мощности Канальный - *Reaktor Bolshoy Moshchnosti Kanalnyi*, ou РБМК) ont été développés en ex-URSS. Toutefois, ils se distinguent par un refroidissement à l'eau et ne comportent pas d'échangeurs de chaleur entre le bâtiment du réacteur et le GTA qui peut ainsi, en cas d'inétanchéité de gaines de combustible nucléaire, se trouver contaminé par des produits radioactifs. Il s'agit d'une filière de type bouillant.

Dans son principe, assez similaire à la filière UNGG, elle est affectée des mêmes difficultés, en particulier concernant la stabilité du flux nucléaire et de strictes limites de fonctionnement. A cela s'ajoute un effet de coefficient positif de température. Autrement dit, toute élévation de température au sein des éléments combustibles s'accompagne d'une croissance du flux nucléaire qui lui-même entraîne une autre augmentation de température. Ce phénomène est par nature dangereux et peut ainsi conduire à la fusion de gaines puis du combustible nucléaire lui-même, soit au-delà de 2 200 °C. Ensuite, au-delà de 1 000°C, la dissociation de la molécule peut s'amorcer en C et O_2, susceptible de favoriser la combustion du graphique utilisé comme modérateur.

A ce jour, suite à l'accident de Tchernobyl (Ukraine), il ne resterait plus que deux unités de ce type en service à la centrale de Koursk en Russie mais qui devraient être définitivement arrêtées dès que les premières unités VVER 1200 MW en constructions sur le site vont démarrer ce qui est désormais le cas depuis le 31 décembre 2025 pour la première unité.
L'enrichissement du combustible qui était à l'origine de 2 % sera porté à 2.6 % suite à l'accident de Tchernobyl et aux études de sureté qui suivirent.
Le rechargement s'effectue en continu.

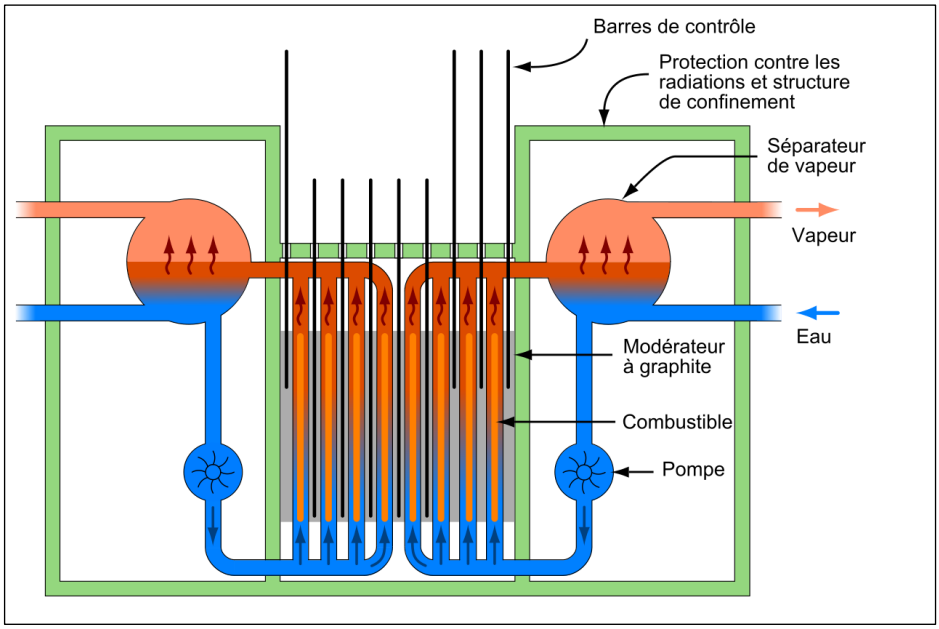


Schéma de principe d'un réacteur RBMK.
Les tubes d'eau circulant dans le réacteur entre les éléments combustibles sont appelés : tubes de force. Il n'existe pas d'échangeur de chaleur intermédiaire mais des ballons séparateurs eau/vapeur.
Schéma via Wikipédia

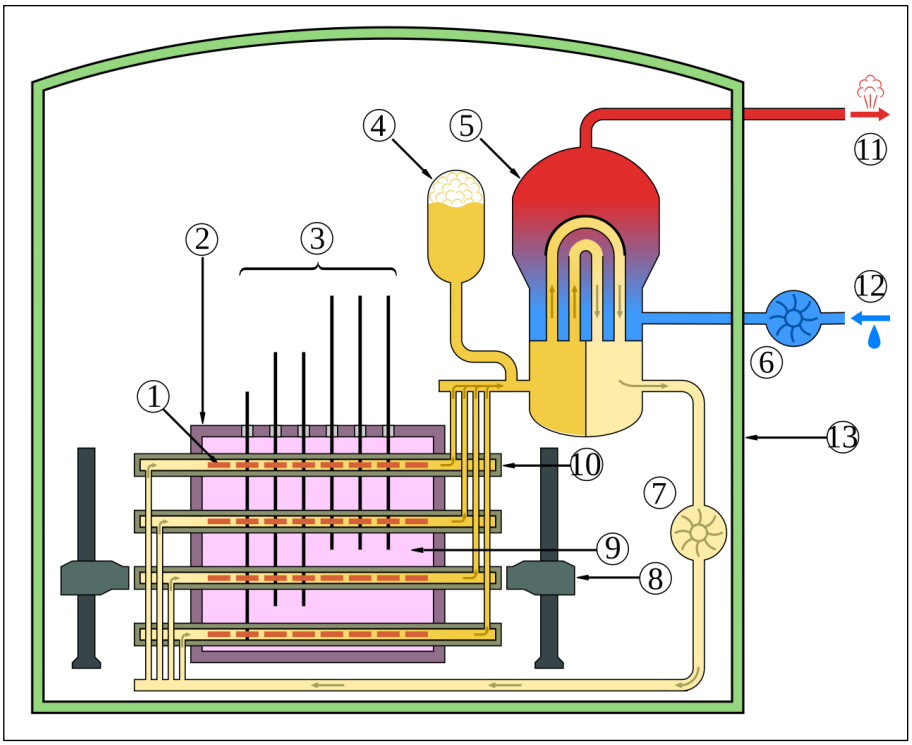


Centrale électronucléaire de Koursk (Ville de Kourchatov). 4 groupes RBMK de 1000 MW. Les tranches 1 et 2 sont en arrêt définitif. Deux Groupes VVER (Filière russe) de 1 200 MW sont en construction (A gauche de la photo). Le premier fut couplé au réseau le 31 décembre 2025. Photo. Rosergo/Rosatom

Au Canada - Filière CANDU

Entre 1950 et 1960, le Canada a développé une filière spécifique au pays, appelée CANDU signifiant : CANada Deutérium Uranium. A lieu du CO_2 comme fluide caloporteur utilisé dans les réacteurs UNGG ou RBMK refroidis à l'eau ordinaire appelée eau légère, la filière CANDU utilise aussi l'uranium naturel mais de l'eau lourde comme modérateur et comme fluide caloporteur.

Pour mémoire, il s'agit aussi d'eau ordinaire mais contenant un neutron de plus dans l'atome d'hydrogène. Le symbole simplifié adopté est D_2O.[19] C'est cette eau qui joue le rôle de modérateur en lieu et place du graphite.
L'eau lourde est contenue dans une enceinte étanche appelée calandre, dans laquelle sont positionnés les éléments combustibles. La chaleur dégagée est transmise à des tubes de force dans lesquels circule l'eau sous pression alimentant l'échangeur de chaleur qui assure la vaporisation de l'eau venant du circuit primaire. Il y a ainsi séparation physique entre le circuit primaire et le circuit secondaire. De cette manière, la vapeur produite assure le fonctionnement du GTA sans risque de contamination radioactive.
Cette filière est également plutonigène. Quant au rechargement en combustible nucléaire il peut s'effectuer d'une manière continue.



Principe de fonctionnement d'un réacteur CANDU. Schéma via Wikipédia

1. **Combustible nucléaire.**
2. **Calandre contenant l'eau lourde.**
3. **Barres de contrôle.**
4. **Pressuriseur.**
5. **Générateur de vapeur.**
6. **Pompe à eau d'alimentation provenant du circuit secondaire.**
7. **Pompe à eau du circuit primaire.**
8. **Système de manutention du combustible.**
9. **Fluide caloporteur (Eau lourde).**
10. **Tubes de force (Eau légère)[20].**
11. **Vapeur vive alimentant le GTA.**
12. **Enceinte étanche en béton précontraint.**

En France, la seule centrale de ce type fut celle de Brennilis (Monts d'Arrée) appelée EL4, dans le département du Finistère nord. D'une puissance électrique de 70 MW, elle fut mise en service en 1967 et définitivement arrêtée en 1985. Toutefois, il s'agit d'un réacteur à eau lourde avec uranium faiblement enrichi mais refroidi au CO_2. Cette installation est en cours de démantèlement prévu jusqu'en 2040.

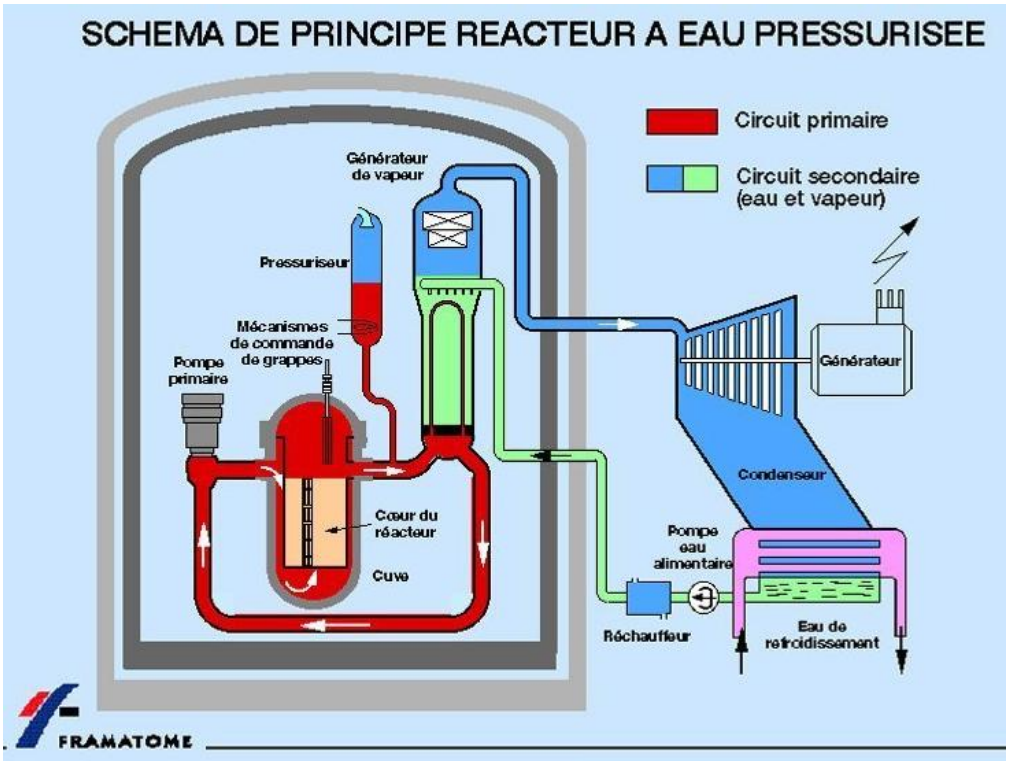
19 Le véritable symbole étant ^2H_2O.
20 Eau légère = Eau ordinaire déminéralisée.

REACTEURS NUCLEAIRES A URANIUM ENRICHI

FILIERE A EAU PRESSURISEE

USA - FRANCE. Réacteurs PWR-REP

Il s'agit de la filière la plus utilisée dans le monde, connue en France sous le sigle REP (Réacteur à Eau Pressurisée). En Occident, elle fut développée par la société américaine Westinghouse dont la France acheta la licence d'exploitation en 1972. D'une puissance de 305 MW, la première centrale équipée de ce type de réacteur fut construite par EDF à Chooz, au bord de la Meuse dans les Ardennes et mise en exploitation en 1967 pour un arrêt définitif en 1991.
Ces réacteurs utilisent de l'uranium ^{235}U (Fissile) enrichi à 3.4 %, le reste étant composé de ^{238}U (Fertile) ce qui nécessite une usine d'enrichissement, généralement par ultracentrifugation comme à Orano (Usine du Tricastin, ex-Eurodif - France).
L'ensemble de l'installation nucléaire (Cf. schémas ci-dessous) est contenu dans une enceinte étanche en béton précontraint maintenue en légère dépression. Elle est prévue pour résister à la pression issue de la rupture brutale d'un élément de tuyauterie du circuit primaire dont la pression nominale de service est de 155 bars.
Le refroidissement des éléments combustibles s'effectue à l'eau légère (Eau ordinaire déminéralisée). Outre le circuit primaire du réacteur, cette enceinte étanche contient les échangeurs de chaleur eau/vapeur saturée pour l'alimentation du GTA.
La modération des réactions nucléaires est assurée par l'eau qui joue en même temps le rôle de fluide caloporteur et le réglage de puissance par des barres de réglage en acier inoxydable et d'autres contenant du bore sous forme $^{10/11}B$.



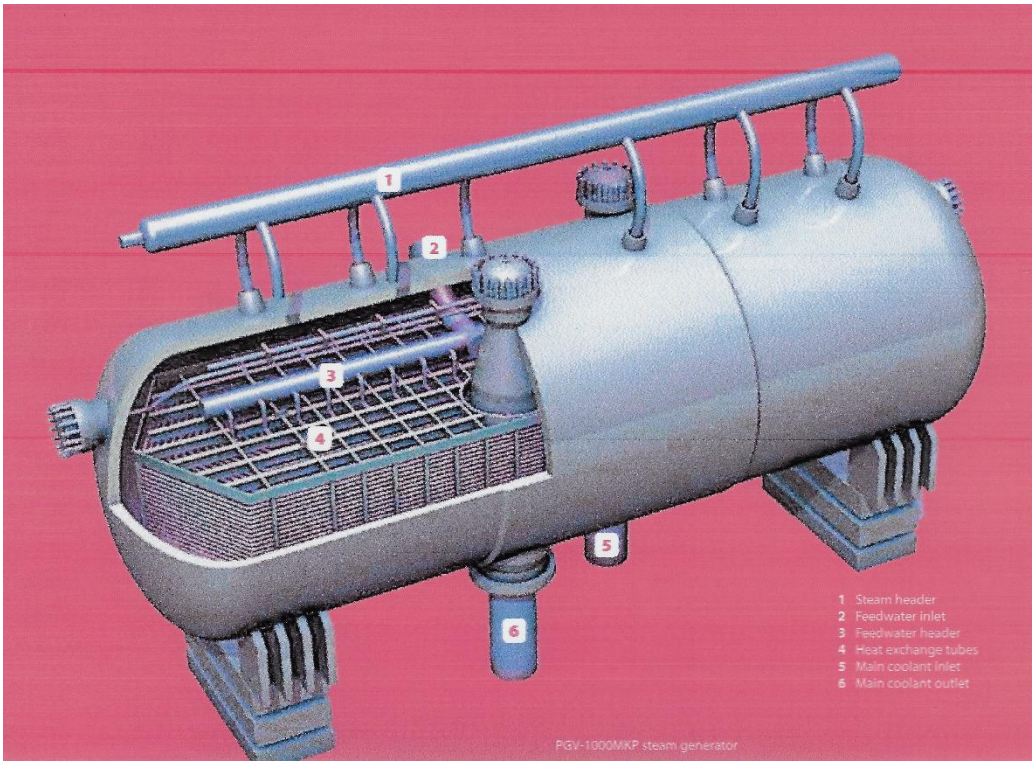
Il s'agit ici d'un schéma correspondant à une unité de la filière REP de 1370 MW bruts, comportant une double enceinte étanche. Ce type d'installation, comporte 4 générateurs de vapeur et donc 4 boucles au circuit primaire contre 3 pour les tranches électronucléaires du palier 905/910 MW.
Schéma FRAMATOME via internet.

L'arrêt du réacteur s'effectue par la chute de toutes les grappes, réglage et arrêt ce qui ne dispense pas d'évacuer la chaleur résiduelle.
Depuis l'arrêt définitif du surgénérateur de Creys Malville fonctionnant au ^{239}PU (Plutonium), des modifications ont été apportées aux éléments combustibles et au système de régulation de certains réacteurs pour consommer le ^{239}PU, d'où le nom de MOX pour Mélange d'Oxydes.
Il n'est pas possible d'effectuer de rechargement en continu ce qui nécessite à terme suivant l'usure du combustible, une période d'arrêt.
Par rapport aux unités à uranium naturel ou faiblement enrichi, l'enrichissement de l'uranium permet d'accéder à des puissances plus élevées pour un volume d'installation plus petit. En revanche, cela nécessite une usine d'enrichissement isotopique ce qui n'est pas gratuit en termes de finances comme de consommation électrique.
En France, la durée de vie calculée d'un réacteur REP est de 60 années mais certains l'estime supérieure. Toutefois, c'est déjà fort correct…

REACTEURS VVER

(Водо-Водяной Энергетический Реактор - Vodo-Vodianoï Energuetitcheski Reaktor)

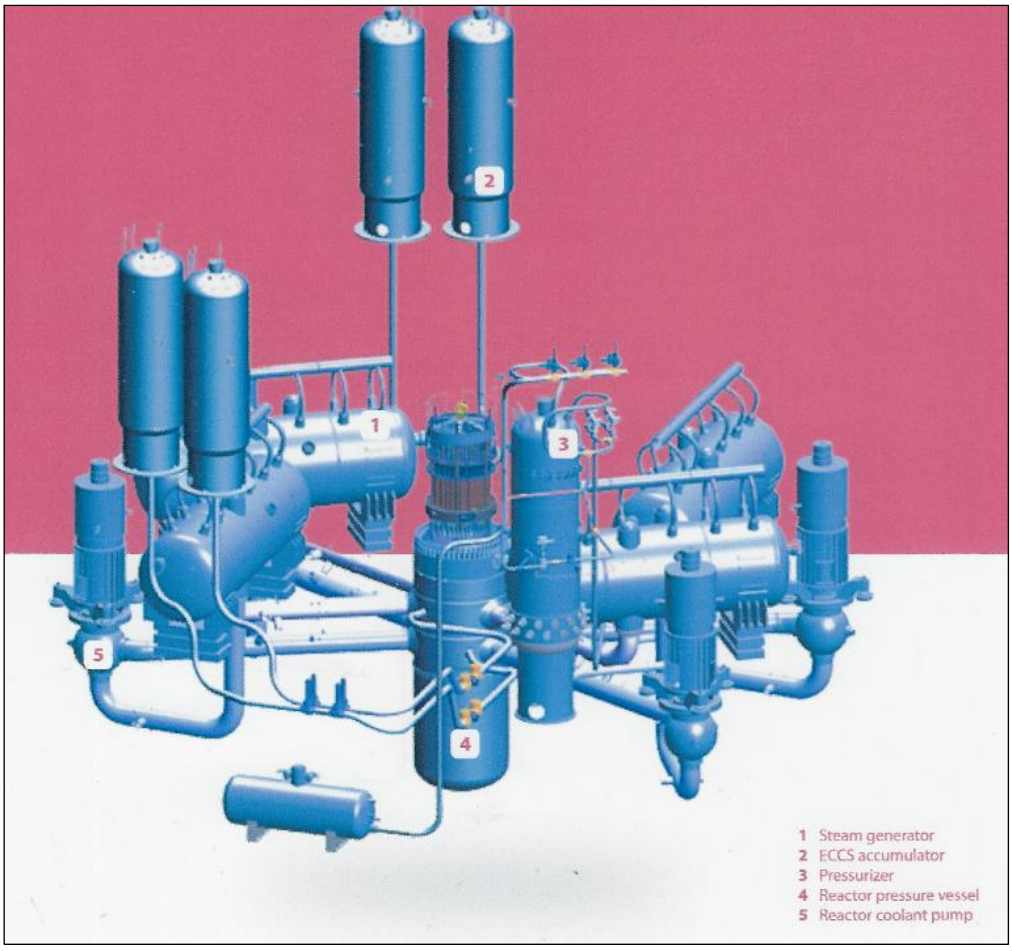
Une filière sensiblement identique aux réacteurs de type REP mais développée en ex-URSS dès les années 50.[21] Actuellement, la puissance maximale est de 1 250 MW et plusieurs unités sont en service et en construction. La Russie souhaite fortement développer l'énergie électronucléaire sur son immense territoire, observons que le pays est déjà le principal constructeur au monde avec près de 75 % des commandes en 2024. Par rapport aux centrales REP françaises, différentes améliorations sécuritaires auraient été apportées, en particulier au niveau de l'assemblage cuve réacteur/tuyauteries primaires mais pas que.
Le schéma ci-dessous montre immédiatement les différences, en particulier au niveau des systèmes de sécurité et des changeurs de vapeur qui sont horizontaux et non verticaux comme pour les REP ce qui conduit à divers avantages comme de moindres possibilités de corrosion, une plus grande surface d'échange eau/vapeur net une simplification de construction. En revanche, le circuit tubulaire est plus important comme le volume du bâtiment réacteur.



Générateur de vapeur d'une unité VVER 1000 MW. Doc. Rosatom

21 Contrairement aux réacteurs REP français et autres en Occident, la filière russe est totalement exempte de licence américaine puisque, semble-t-il, à l'origine même du principe de fonctionnement.

Il n'est pas possible d'effectuer de rechargement en continu ce qui nécessite des arrêts programmés pour cela. De même, pour les unités de 1000 MW, l'enrichissement du combustible nucléaire est de 4.5 % et de 5 % pour les unités de 1 200 MW et 1250 MW pour ≈ 3.5 % pour les réacteurs REP en France.
Depuis l'accident de Tchernobyl en Ukraine, il est évident que ce type de filière a remplacé le modèle RBMK, moins sécurisant comme d'ailleurs les UNGG en France avec les REP.



Réacteur russe VVER 1200.
Schéma ROSATOM



Centrale électronucléaire de Zaporijjia équipée de 6 groupes VVER de 1 000 MW. Photo. atomic-energy.ru.

PETITE CENTRALE NUCLEAIRE FLOTTANTE RUSSE
UNE UNITE INNOVANTE…

En 2020, la Russie a mis en service une petite centrale VVER sur barge à fond plat, nommée AKADEMIC LOMONOSOV (Академик Ломоносов Певек)
Il s'agit d'un projet mené par ROSERNERGOATOM, filiale de ROSATOM, la grande société russe d'état consacrée à l'énergie nucléaire, soit environ 350 000 personnes.
Affichant une longueur de 144 m pour une largeur de 30 m et un tirant d'eau de 5.6 m, elle pèse 21 500 t. Cette barge peut ainsi s'amarrer en eaux peu profondes et est actuellement stationnée à Pevek en Sibérie orientale. Equipée de deux réacteurs VVER de 32 MW chacun, elle fournit environ 20 % en électricité des besoins de la ville qui compte près de 5 000 habitants ainsi que 150 MWth (Thermiques) pour le chauffage.
Cette installation donnant manifestement satisfaction, un autre projet similaire est en cours de construction mais comportant des améliorations et une augmentation de puissance de l'ordre de 20 %. Il s'agit ici d'une conception intéressante et plusieurs pays envisagent de telles unités qui peuvent être amarrées en divers lieux se prêtant à l'exploitation de ce type de centrale dont le coût de revient et d'exploitation reste manifestement compétitif par rapport à d'autres solutions plus classiques



AKADEMIK LOMONOSOV en cours de manœuvre.



Intérieure de l'installation.



Salle de commandes ultra moderne. Toutes photos de CTPAHA POCATOM.

REACTEURS BWR

Autre filière américaine mais développée par la Sté. Babcock and Wilcox suivant le principe d'un réacteur à eau légère pressurisée à 65 bars mais bouillant. Comme il n'y a pas d'échangeurs de chaleur entre le réacteur et le GTA, cela confère comme avec la filière RBMK, une moindre protection du circuit secondaire qui peut ainsi se trouver contaminé par les produits de fission provenant de fuites depuis les gaines de combustible. Cette disposition financièrement économique, oblige néanmoins à construire un bâtiment étanche autour du GTA et de ses auxiliaires.

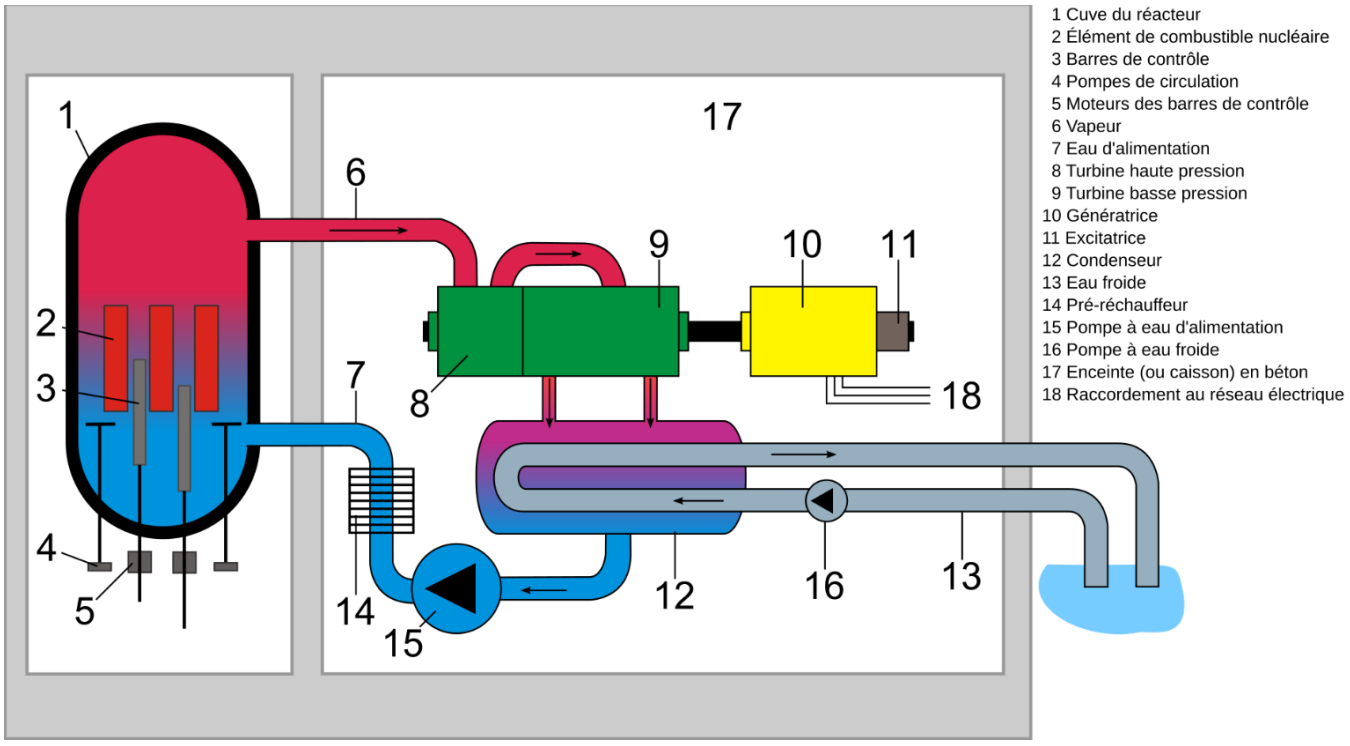


Schéma de principe d'un réacteur BWR. Schéma Wikipédia via internet.

Le rechargement en continu du réacteur n'est pas possible et nécessite des arrêts pour cela.
Durant le gouvernement de Pierre Messmer, George Pompidou étant Président, cette filière avait été étudiée par la France dans les années 1972, avant son acquisition de la licence PWR (Pressurised Water Reactor) de la Sté. Westinghouse qui deviendra ultérieurement REP.
En revanche, il en existe plusieurs unités fonctionnant aux USA et dans le monde dont fit partie la centrale de Fukushima, au Japon.

Note importante
Les centrales comportant des échangeurs de chaleur entre le circuit primaire et le circuit secondaire offrent une bien meilleure garantie vis-à-vis de l'environnement. En effet, entre les gaines du combustible nucléaire, les échangeurs de chaleur et les tubes du condenseur de vapeur d'eau à l'échappement de la turbine, cela fait trois barrières contre deux pour les autres filières.

AUTRES FILIERES

REACTEURS A THORIUM

Ce type de filière, qui offre plusieurs avantages, est en cours de développement en Chine.
Le thorium de notation ^{232}Th est abondant dans la nature, soit environ quatre fois plus que le ^{235}U mais il s'agit d'un élément fertile et non fissile, autrement dit : inerte. Ses descendants sont tous radioactifs suivant :

$$n \rightarrow {}^{232}Th \rightarrow {}^{233}Th \rightarrow {}^{233}Pa \text{ (Proactinium)} \rightarrow {}^{233}U \text{ fissile}$$

Suivant cela, tout reposerait sur le moyen de faire réagir de ^{232}Th sans utiliser une source neutron (n) ce qui, a priori, ne semble guère possible. Ce type de réacteur présenterait une bonne sécurité générale naturelle et de moindres déchets par rapport aux unités REP et BWR, surtout à vie longue. De plus, il serait susceptible d'activement participer à la non proliférations d'armes nucléaires. Certains n'hésitent d'ailleurs pas à le qualifié de filière bio pour l'avenir… C'est toutefois sans doute aller un peu vite… En effet, au moins actuellement, la maîtrise du processus depuis la mine jusqu'au retraitement des déchets en passant par l'exploitation d'un réacteur opérationnel s'avère complexe et beaucoup plus onéreuse que la filière REP actuelle.
De nombreux pays ont mené des recherches à ce sujet et même jusqu'à d'importantes puissances mais toutes ont été arrêtées à échéances de quelques années. Néanmoins, l'Inde dont le sous-sol est riche en thorium mène depuis longtemps et activement des recherches en ce domaine. Quant à la Chine, dans le désert de Gobi, elle développe un réacteur expérimental au thorium, refroidi et modéré par un sel fondu. Une installation qui devrait être opérationnelle dans les années à venir. D'autres pays sont également motivés pour de telles recherches.

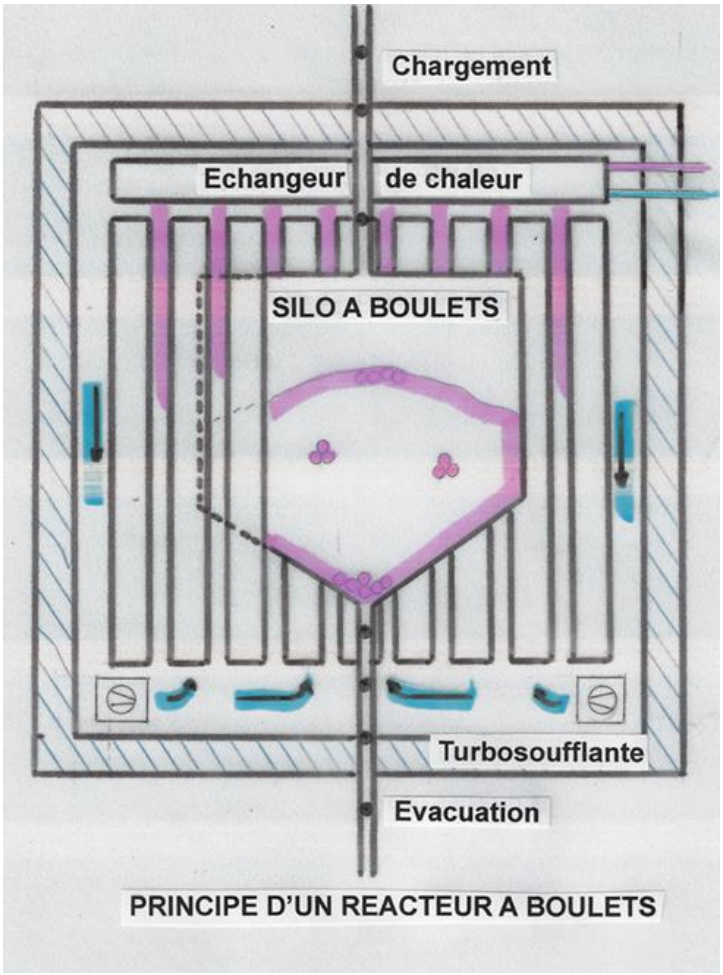
LA FILIERE A BOULETS

Il s'agit ici d'une filière en son temps étudiée par les Allemands et les Américains dans les années 60 et dont le principe fut repris par la Chine avec la mise en service en 2000 d'un premier prototype de 10 MW refroidi à l'hélium. D'autres tentatives comme en Allemagne eurent également lieu avec plus ou moins de succès.
Dans ce type de réacteur dénommée PBR (Pobbled Bed Reactor) mais qui est en réalité un HTR (Hight Temperature Reactor), il n'existe plus de gaines de combustible. Celles-ci sont remplacées par des boulets sphériques ou hexagonaux d'un diamètre de ≈60 mm contenant le combustible nucléaire enrichi à 8.5% enrobé de graphite. Le fluide caloporteur est un gaz ce qui permet comme pour les autres filières, de produire aussi bien une source de chauffage que d'électricité avec un cycle thermodynamique classique. Le rechargement peut ainsi s'effectuer en continu ce qui présente aussi un avantage au niveau rentabilité.

Quant à la température de la vapeur produite, elle atteint à ce jour 500 °C mais les températures obtenues dans le silo peuvent être plus élevées ce qui ouvre la porte à un rendement du cycle thermodynamique nettement supérieur à celui des filières REP et BWR qui ne dépasse pas 33/35 % par suite d'une basse température de vapeur, soit 256°C à 100 % de Pn pour les unités françaises.
Ainsi, dans la baie de Shidao, deux réacteurs HTR associés à une seule turbine à vapeur de 200 MW, vit l'alternateur couplé au réseau en décembre 2023. Par ailleurs, suivant les concepteurs chinois, il apparaitrait que ce type de filière soit très prometteur et permettrait même de grandement simplifier le système de refroidissement par simple circulation naturelle du gaz, d'autant plus que cette filière apparaît auto stable. Autrement dit, en cas d'élévation anormale de température, la réaction nucléaire de fission se stabilise limitant ainsi le risque d'accident.
Sans s'aventurer outre mesure, il est néanmoins possible d'estimer que cette technologie pourrait également utiliser en partie le thorium comme d'autres éléments, y compris dans une certaine mesure, certains déchets nucléaires.

Principe

Dans une enceinte étanche en béton, protégée par une peau métallique, un silo reçoit des boulets composés d'uranium et de graphite.
Le fluide caloporteur est un gaz inerte sous pression mis en mouvement par des soufflantes, lequel cède ses calories dans un échangeur. Cet échangeur cède lui-même son énergie thermique à un autre échangeur eau/vapeur d'eau vers un groupe turboalternateur ou air-air destiné à du chauffage, par exemple, ce qui constitue une troisième barrière vis-à-vis de l'environnement mais ceci n'est pas systématique.
D'autres pays travaillent toujours sur cette filière dont les USA et la France.



PRINCIPE D'UN REACTEUR A BOULETS

DOCUMENTATION PERTINENTE

Consulter les sites des sociétés et des organismes suivants : EDF - ORANO - ASN - ASNR - IRSN - CEA - BRGM (Bureau de Recherches Géologiques et Minières).
Certains articles sur Wikipédia consacrés à l'énergie électronucléaire.

- Атомные электростанции - с реакторами типа ВВЭР /PWR
  Анализ, тенденции, перспективы
- THE VVER TODAY - EVOLUTION DESINGN SAFETY - Sté. Rosatom

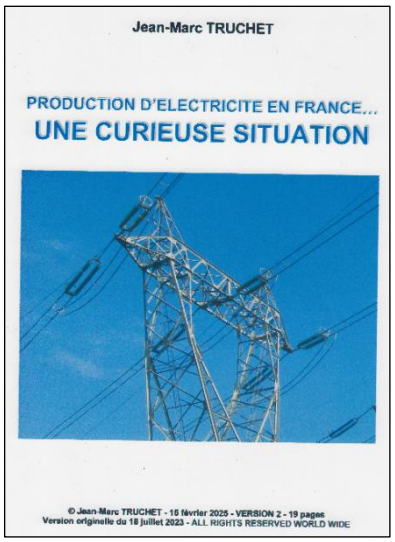
Du même auteur

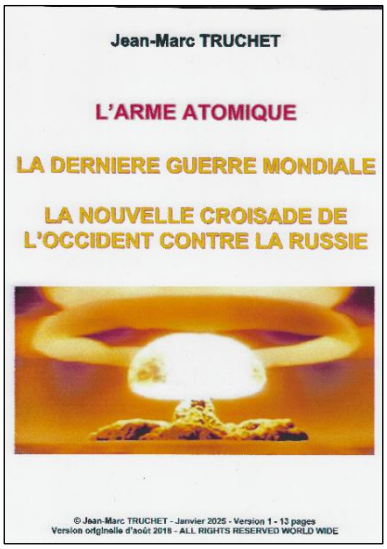
Consulter les études suivantes sur le site internet : **www.laplumedutemps.com**

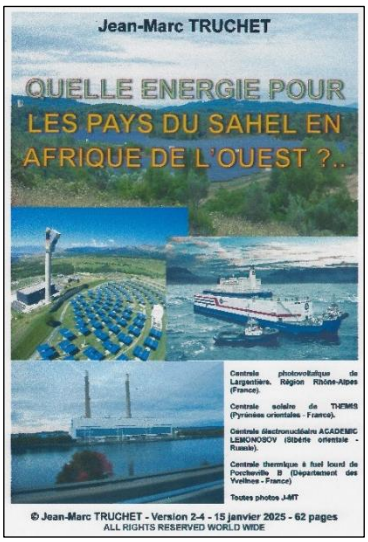
- PRODUCTION D'ELECTRICTE EN FRANCE - UNE CURIEUSE SITUATION
- CONSEQUENCES TECHNIQUES ET ECONOMIQUES DES ENERGIES RENOUVELABLES POUR LE PARC ELECTRONUCLEAIRE FRANCAIS
- SECURITE ET SURETE DES CENTRALES NUCLEAIRES
- CENTRALES ELECTRONUCLEAIRES - SURGENERATEUR A FISSION. REACTEURS A FUSION NUCLEAIRE
- QUELLE ENERGIE ELECTRIQUE POUR LES PAYS DU SAHEL ?
- L'ARME ATOMIQUE - LA DERNIERE GUERRE MONDIALE
- L'AFFAIRE DE LA TOUNGOUSKA - D'AUTRES HYPOTHESES

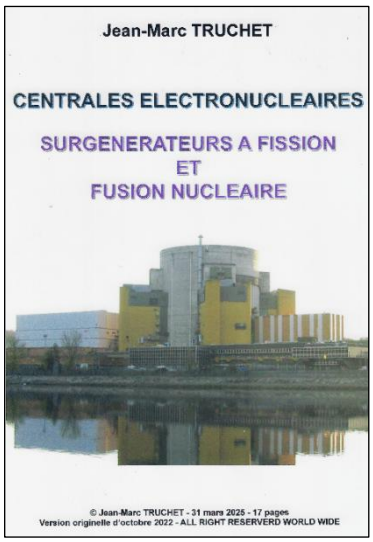
Chaine youtube : **@laplumedutemps.com** - Consulter les vignettes











TOUS LES LIVRES ET TOUTES LES ETUDES DE L'AUTEUR SONT EN LIBRE ACCES DEPUIS LE SITE : www.laplumedutemps.com

© Jean-Marc TRUCHET.
Version originelle : 15 mars 2025
Revue et corrigée en août 2026