

Fukushima en France ?

Peut-on se passer du nucléaire ? Rien n'est simple !

Dans ces temps de catastrophe imminente, je voudrais vous apporter un éclairage sur ce qui est dit et ce qui n'est pas dit quant au risque nucléaire présent.

Nous avons tous en mémoire, l'accident de Tchernobyl, mais peu se souviennent de "3 miles Island", ou de St Laurent des eaux.

Je ne suis pas un "expert" du nucléaire, mais j'ai fait un mémoire sur la chimie des eaux dans une centrale et j'ai étudié les risques liés à l'exploitation nucléaire.

Je travaille dans des secteurs connexes de l'énergie depuis bientôt 35 ans et depuis 5 ans je me consacre corps et âmes aux énergies renouvelables.

Ce sujet est très complexe, je vous en fais ce mémoire pour vous permettre de fixer vos idées et opinions et vous donner quelques liens pour aller plus loin. Il y a un dossier complet en annexe.

Il faut, aussi, bien comprendre que l'énergie est au cœur d'enjeux stratégiques vitaux. Aristote l'avait déjà dit.

Si je fais un raccourci, avons nous "Tchernobyl" à nos portes ? Questions que nous pourrions nous poser avec ce qui se passe au Japon.

Une central nucléaire n'est ni plus ni moins qu'une grosse machine à vapeur dans laquelle le charbon ou le combustible fossile est remplacé par de l'uranium dont la concentration permet une réaction qui produit de la chaleur par destruction des atomes. C'est en fait la variation de masse de ces atomes (relativité restreinte) qui induit cette production d'énergie qui peut être très importante puisque c'est grosso-modo ce qui se passe dans le soleil.

Pour éviter que cela ne "s'emballe", il faut modérer cette réaction avec des adjuvants qui sont le bore (sous la forme d'acide borique quand il est dissout dans l'eau) et l'eau. On les appellera modérateurs.

Cependant, la variation de masse des atomes s'accompagne de rayonnement (alfa, bêta, gamma) et d'émissions de nucléides (protons, neutrons, électrons). Ces émissions peuvent être arrêtées par une simple de papier pour les moins énergétiques, ou seulement ralenties par une forte épaisseur de plomb pour les plus énergétiques.

Il y a plusieurs possibilité d'exploiter cette "chaudière à vapeur". Tout dépend de l'objectif attendu et du fluide caloporteur qui permet de transférer la chaleur des barres de combustible au générateur d'énergie mécanique qui est une turbine laquelle est couplée à un générateur électrique.

Lorsque je dis soviétique, c'est pour ne pas mettre en cause les russes, ou les pays de l'ancien bloc de l'Est, qui subissent aujourd'hui les errances d'une politique antérieure pour laquelle ils n'eurent pas obligatoirement le choix, ni le pouvoir de s'opposer.

La filière graphite gaz. Le gaz caloporteur fut le CO₂. Les barres de combustibles étaient noyées dans des blocs de graphite. Le CO₂ passait dans un échangeur qui transmettait la chaleur à l'eau. Celle-ci une fois vaporisée entraînait des turbines.

Elles furent les premières. Plus d'une dizaine en France furent exploitées et il y eu plusieurs accidents graves de fusion au sein du cœur. C'est une des raisons de leur abandon. Elles sont toujours, après plus de 16 ans, en cours de démantèlement.

La filière à eau pressurisée. Parallèlement et à la même époque, fut développée la propulsion nucléaire de navires et surtout de sous-marins. C'est pour cela que fut créé le cycle dit PWR (en anglais), VVR (soviétique), en français REP (réacteur à eau pressurisée). C'est le procédé Westinghouse qui fut acheté par la France en 1969. La chaleur est produite dans un enceinte confinée (en béton et acier) au sein d'une cuve emplies d'eau sous pression à 15 Mpa (mégapascal). En France, la grosse tour cylindrique visible avec un dôme sphérique n'est que la partie externe du réacteur ou se trouve le pont roulant qui sert à sortir les parties mécaniques. La zone de confinement est sous terre et les barres de combustible sont retirées par un robot sous marin qui les transfère dans la piscine qui est aussi en zone confinée sous terre.

L'eau circule dans la cuve avec des pompes (dites primaires). A côté se trouve un réservoir contenant au moins la même quantité d'eau et servant à la mise en pression globale et le piégeage de l'hydrogène produit. La température moyenne dans le circuit primaire est de 310°C.

L'échange de chaleur avec le circuit d'eau qui alimente les turbines est pratiqué par 4 ou 5 générateur de vapeur suivant la puissance. Ce circuit est appelé circuit secondaire .

En fin de détente des turbines la vapeur passe dans un condenseur et la chaleur en est extraite par un circuit indépendant appelé circuit tertiaire qui va dans les immenses tours de refroidissements installées à proximité (source froide). Ce même circuit peut être (dans 99% des cas) complété par un circuit d'eau naturelle (mer ou fleuve). Donc au total 4 circuits. A ce titre, je précise que passer de 10°C à 15 °C à la source froide fait perdre 0.5% de la puissance de la centrale, soit pour 1000 MW, 5 MW c'est à dire l'alimentation de 1200 maisons. Il y a eu un accident notable, et quasiment le seul, sur ce type de centrale : 3 miles island aux USA.

La filière eau bouillante (BWR). Elle n'existe plus en France. Elle a été développée sous 2 formes.

La différence fondamentale avec un réacteur PWR est qu'il n'y a pas de circuit primaire. Le réacteur est donc le siège de la vaporisation. de l'eau qui va être turbinée. Ceci implique que le niveau dans le générateur de vapeur quand il est indépendant et à côté du réacteur soit très stable et constant. Ce sont des centrales pour lesquelles les variations de charge sont délicates à conduire.

La forme RBMK (soviétique) : C'est la centrale de Tchernobyl. Le réacteur n'est pas confiné et l'échange entre les barres de combustible et l'eau est réalisé par une enveloppe de graphite.

L'eau est vaporisé dans le sommet du réacteur et la vapeur part directement aux turbines.

Les pompes qui mettent en pression l'eau après la condensation sont mues soit par la vapeur générée soit par le réseau électrique.

Les barres de contrôles qui permettent faire varier la puissance en ralentissant la réaction sont motorisées à la descente et n'ont pas de système de sécurité de "tomber" dans le réacteur pour stopper la réaction. Elle mettaient 20 s pour descendre, contre 2 s pour un système conventionnel.

Ce type de réacteur est particulièrement exposé au risque d'empoisonnement au Xénon 135 qui est un sous produit de la désintégration de l'Iode 135.

Tous ces éléments rassemblés, font que ce sont des réacteurs très difficiles à conduire notamment lors des phases de démarrage pendant lequel le refroidissement est primordial et le plus difficile à assurer du fait des turbo-pompes à vapeur liées au process et l'absence, à l'époque de système de fourniture de chaleur et d'électricité de secours.

De plus la présence conjointe de carbone surchauffé et de vapeur d'eau conduit inévitablement à une explosion. (cf accident carbone lorraine à Gennevilliers en 2010 qui fit 4 morts)

L'accident de Tchernobyl est le cumul de tous ces facteurs plus quelques erreurs humaines.

Il reste 11 centrales de ce type en service. Elles ont été en principe "sécurisées" depuis l'accident.

La forme Japonaise : Les différences sont notables en matière de sécurité : enceinte de confinement inertée avec un gaz, générateur de vapeur indépendant du réacteur, pompes alimentées électriquement. Réservoir d'eau au dessus du réacteur.

Mais il y a quelques défauts :

Les barres de combustibles sont chargées par le bas du réacteur ou se trouve la piscine de stockage des barres usagées et des barres en attente de chargement. De même les barres de contrôle sont en bas et nécessite de l'énergie pour être mues.

En cas de surchauffe, le bas du réacteur est noyé, mais le haut, où était l'eau, chauffe et l'eau résiduelle se vaporise et peut se désintégrer en hydrogène.

Il ne faut pas oublier que le principal produit de désintégration est l'hydrogène et qu'à partir de 800 °C l'eau sur l'acier produit instantanément de l'hydrogène (expérience de Lavoisier qui prouve l'existence de H₂).

Il faut aussi savoir qu'un circuit n'est jamais complètement étanche à la radioactivité. Le risque de fuite et de contamination des turbines est réel, comme le risque de contamination au niveau de la source froide avec la corrosion des échangeurs par l'eau naturelle.

A Fukushima, le tremblement de terre provoque la mise à l'arrêt des réacteurs qui sont alors refroidis par l'énergie électrique du réseau. Malheureusement, le tsunami arrive et noie tous les systèmes d'alimentation électrique et les systèmes de secours. Les centrales ne sont plus refroidies.

L'eau surchauffée fait sauter les joints d'explosion, qui sont là en cas de surpression de vapeur, et la surchauffe des réacteurs provoque la production d'H₂ chauffé qui explose alors spontanément au contact de l'air et détruit les superstructures des installations.

La centrale n'était pas suffisamment protégée contre les tsunamis.

Aujourd'hui la surchauffe du réacteur a produit la fusion des barres de combustible (St Laurent des eaux, 3 miles island), mais, à ce jour, cette fusion n'ayant pas été contrôlée a entraîné la fusion du cœur du réacteur et la création d'un corium (contraction de core et uranium) qui est en train de percer la cuve d'un ou de 2 réacteurs.

Que peut-il se passer en France ?

Il n'y a plus de réacteur à eau bouillante en France. Il n'y a pas de réacteur RBMK .

Toutes les parties liées à la manipulation du combustibles sont sous l'eau dans une enceinte confinée. L'accès aux piscines de stockage est séparé du réacteur par une enceinte bétonnée résistante au manque d'eau du réacteur.

Le réacteur est enterré. La cloche (visible) résiste à la chute d'un avion gros porteur (Boeing 747 qui volait déjà à l'époque).

De mémoire d'homme, il n'y a jamais eu de raz de marée sur les côtes Atlantique de la France. Ce n'est pas le cas en Méditerranée mais il n'y a pas de centrale sur les berges.

Le risque sismique existe pour près de la moitié de nos centrales. Que ce passerait-il en cas de séisme. Un même séisme ne frapperait pas toutes nos centrales. Les sécurités fonctionneraient comme à Fukushima ou lors du séisme de Kobé.

Quant à la solidité des structures.... Qu'est-ce qui résisterait à un séisme de magnitude 8 ou plus ? Y en a-t-il eu en France ?

La zone de subduction au large de Nice est la plus dangereuse. Il n'y a pas de centrale.

Peut-on se passer du nucléaire ?

Oui et non.

Oui parce que :

Nous avons suffisamment de ressources naturelles surtout si nous exploitons l'énergie volcanique, comme en Islande, et plus efficacement l'énergie marémotrice et hydraulique et les biogaz.

Le rendement effectif en énergie primaire d'une centrale (puissance du combustible sur énergie consommée en bout de ligne) est très bas : 2 % de la masse du combustible est utilisée + cycle de vapeur avec un rendement de 36% + rendement de transport de l'ordre de 50% soit un rendement global de 0.36%. Un moteur de voiture c'est 30% soit près de 100 fois plus.

Le rendement massique du combustible est en cours d'amélioration grâce au retraitement du combustible utilisé (passer de 2 % à 10 %) avec l'incorporation du plutonium.

L'utilisation de micro-centrales avec des énergies renouvelables, près des lieux de consommation, permettra d'économiser une grande quantité d'énergie perdue en transport parce que les centrales nucléaires ne peuvent pas être implantées en centre ville, même si certains pensent que des centrales du type de celles des sous-marins ou de porte-avions pourraient bien être mise en ville.

50 ans de communication d'EDF et GDF ont conduit à une sur-consommation d'électricité : un chauffage électrique est une aberration technique à laquelle une utilisation plus importante des biogaz peut remédier. Le chauffage représente 60% des consommations d'énergie domestique.

Les coûts d'investissement nucléaires sont trop importants et ne prennent pas en compte les frais de remise en état des sites.

Les techniques de démantèlement ne sont toujours pas au point.

Aujourd'hui, en France 80% des villes de plus de 1000 habitants pourrait être chauffées par géothermie. Sachant faire du froid avec du chaud (procédés à absorption), on peut même les climatiser ou générer du froid pour les industries (agro-alimentaire) qui en ont besoin.

Ci-dessous les coûts d'investissement par source d'énergie

Puissance en kW	énergie	Investissement par kW	Amortissement comptable	Nbre d'heure de fonctionnement annuel	Amortissement par kWh
1	Nucléaire	2000 €	40 ans	7200 h	0.0069 €
1	Nucléaire EPR	3000 €	40 ans	7200 h	0.0104 €
1	Eolien	1000 €	20 ans	2000 h à 3000 h	0.025 > >0.0166 €
1	Photovoltaïque	6 000 €	20 ans	2000 h	0.15 €
1	Solaire thermodynamique	1500 €	40 ans	3500 h	0.0107 €
1	Diesel	130 €	10 ans	7500 h	0.00173 €
1	Turbine à vapeur chaudière au fioul	600 €	20 ans	8000 h	0.00375 €
1	Houlo-générateur	2444 €	30 ans	6000 h	0.01357 €

Non parce que :

Ne plus utiliser l'énergie nucléaire serait , à court terme, ne plus avoir d'aciérie, de fabrique d'aluminium,..., à cause de la demande instantanée d'énergie.

L'engagement pris pour l'énergie nucléaire nous oblige à utiliser nos équipement jusqu'à ce qu'ils ne puissent plus fonctionner, c'est à dire encore un "certain temps".

La France fait partie des premiers producteur de centrales nucléaires. Peut-on vendre au monde entier sans avoir de démonstrateur en France ?

Nous avons vécu 50 ans sous le monopole d'EDF et GDF. Comment en sortir ?

Quelle stratégie adopter dans les contextes économiques actuels ? Quelle rentabilité économique aux énergies renouvelables ?.....

Pour conclure :

Comme vous pouvez le constater, le problème n'est pas simple à résoudre.

Certains points ont été pris en compte dans les lois du grenelle II de l'environnement.

En ma conscience, il est possible "d'économiser" les centrales nucléaires existantes en les monopolisant pour les utilisations pour lesquelles l'électricité n'est pas substituable : l'éclairage, l'énergie motrice (tgv, laminoires, remonte-pentes, ou plus simplement les machines à laver), médias (téléphonie, télévision,...), informatique.

Compte tenu de mes connaissances et des études faites, sur les 58 réacteurs en service, 40% au moins pourraient être mis en veille d'ici 20 ans en rationalisant la consommation électrique. Seulement, une centrale nucléaire à l'arrêt a un coût de maintien très important. N'est-ce pas un prix à payer !

Cependant, les énergies renouvelables, dont les matériels seraient fabriqués en France, représenteraient près d'un million d'emploi. Au détriment de quelles autres industries ?

Mais quel séisme réel ou idéologique (demander au CE d'EDF de baisser ses revenus de 50%) pourra le faire ?

Avec tout cela, vous comprendrez que le "tout voiture électrique" n'est pas pour demain.

Plan des annexes :

Qu'est-ce qu'une centrale nucléaire ?

Qu'est-ce qu'une matière fissile ?

Comment fonctionne la chaudière ?

Puissance calorifique de l'uranium.

Mais la fission nucléaire n'est pas la combustion du pétrole !

L'eau comme fluide de refroidissement.

Comment exploiter la chaudière ?

-réacteur BWR (RBMK)

-Les centrales REP (PWR)

Les zones de sismicité en France

Qu'est-ce qu'une centrale nucléaire ?

Une machine à vapeur :

Le charbon a été remplacé par une matière fissile qui ne "brûle" pas.

Pour qu'une machine à vapeur fonctionne elle doit répondre au condition de fonctionnement d'un cycle thermique di-therme (à deux sources : une source chaude, une source froide) , il faut une réserve d'eau (a), un circuit de purification de l'eau (b), introduire cette eau dans le circuit (c), (1) monter cette eau en pression, (2) chauffer cette eau (source chaude), (3) vaporiser l'eau, la détendre dans une machine thermique. Il y a alors deux solutions : lâcher cette vapeur dans la nature (à la source froide) c'est le cas de la locomotive à vapeur ou recycler cette eau. Dans ce 2^{ème} cas il faut refroidir la vapeur détendue pour la condenser et ainsi la faire repartir en (1).

Qu'est-ce qu'une matière fissile ?

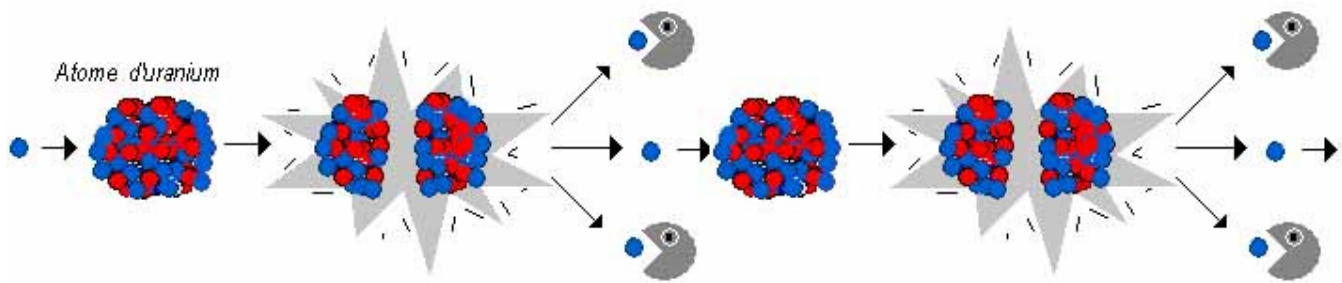
Découvert par Becquerel puis prouvé par Pierre et Marie Curie, la radioactivité est la source de cette fission. Tout élément naturel se dégrade. Cette dégradation, ou désintégration dont la durée est appelée période et peut être très longue (plusieurs milliards d'années), est montrée par le tableau périodique des éléments de Mendeleiev (cf annexe au format pdf : les numéros atomiques représentent le nombre de protons des atomes, c'est à dire aussi le nombre d'électrons.) mais fut expliqué grâce à la théorie de la relativité restreinte de A. Einstein $E = mc^2$. La masse et l'énergie sont liées. Toute variation de masse implique une variation d'énergie. Nous connaissons les aspects stables des éléments : l'azote, l'oxygène, le fer, le calcium, ..., mais chacun possède un version instable qui s'appelle un isotope. C'est un même atome mais il lui a été ajouter un ou plusieurs protons. (les éléments constitutifs de l'atome). Ainsi, la dégradation se fait d'isotope en isotope. (cf wikipedia table des isotopes : il sont représentés avec leur période de demi-vie)

Tous les isotopes ne sont pas radioactifs par exemple l'hydrogène à deux isotopes , le deutérium (non radioactif) et le tritium (radioactif), mais certains isotopes sont naturellement radioactifs : l'uranium 235, le potassium 40, l'iode 131, le cobalt 60, le carbone 14,

Il s'en suit l'émission d'un rayonnement qui est variable suivant les particules émises ou capturées. : rayons alfa émission de d'hélium, rayons bêta émission d'un électron ou d'un proton, rayons gamma émission d'un rayonnement simple mais très énergétique avec un neutrons, rayon X idem que le rayon gamma mais moins énergétique.

N'oublions pas que dans un atome, les neutrons constituent la masse.

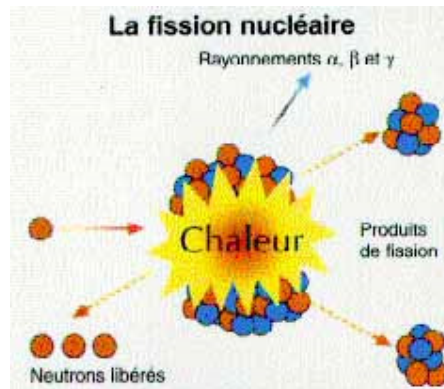
Pour alimenter notre chaudière nucléaire, il faut donc prendre un élément naturellement instable, c'est à dire qu'il a un noyau trop gros pour garder ses neutrons, ses protons et par voie de conséquence ses électrons. En l'occurrence, il s'agit de l'uranium (dit 238) qui a une forme très radioactive, l'uranium 235. Pour être utilisable, la teneur en uranium 235 doit être augmentée pour atteindre des valeurs de 3% à 5%.



Comment fonctionne la chaudière ?

Il suffit de mettre une certaine masse de matière fissile au milieu d'un fluide qui transporte la chaleur vers la machine thermique. Pour les matières fissiles cette masse est dite masse critique. En dessous d'une masse la réaction ne démarre pas. 9 kg d'uranium 235 sont nécessaires pour l'amorçage de la réaction dite réaction en chaîne. En effet un atome d' U^{235} émet beaucoup de neutrons. Ces neutrons vont désintégrer l'atome voisin qui en désintégrant libère beaucoup d'énergie (perte de masse suivant $e=mc^2$) et surtout beaucoup de neutrons qui désintègrent l'atome voisins etc...

De fait, la variation de masse des atomes produit beaucoup d'énergie sous la forme de chaleur qui est transmise au fluide caloporteur.



Amorcer une fission dans un réacteur nucléaire s'appelle la divergence, le démarrer c'est le diverger.

Puissance calorifique de l'uranium (extrait Internet):

Masse d'un noyau d'uranium :

L'expérience montre que la masse d'un noyau d'uranium vaut 234,9935u où u représente l'unité de masse utilisée par les physiciens spécialisés dans la physique atomique : $1u = 1,6606 \cdot 10^{-27} \text{kg}$. Donc la masse de l'atome d'uranium est : $m = 234,9935 \cdot 1,6606 \cdot 10^{-27} = 3,90230206 \cdot 10^{-25} \text{kg}$

Nombre de noyaux d'uranium contenus dans 1g d'uranium :

1 noyau $\rightarrow 3,90230206 \cdot 10^{-25} \text{kg}$ x noyaux $\rightarrow 0,001 \text{kg}$ Donc $x \cdot 3,90230206 \cdot 10^{-25} = 1 \cdot 0,001$ Soit $x = 0,001 / 3,90230206 \cdot 10^{-25} = 2,56 \cdot 10^{21}$ Dans un morceau d'uranium de 1g il y a 2,56.1021 atomes d'uranium.

Disparition de masse lors d'une fission nucléaire :

L'expérience montre que lors de la fission d'un noyau d'uranium il disparaît une masse de $3,15 \cdot 10^{-28} \text{kg}$. Donc lors de la fission de 1g d'uranium il disparaît une masse $m_{\text{disparue}} = 2,56 \cdot 10^{21} \cdot 3,15 \cdot 10^{-28} = 8,07 \cdot 10^{-7} \text{kg}$

Energie libérée par la fission de 1g d'uranium :

Selon la relation $E = mc^2$, la disparition d'une masse m s'accompagne en contrepartie de l'apparition d'énergie sous forme de chaleur : $E_{\text{apparus}} = m_{\text{disparue}} c^2 = 8,07 \cdot 10^{-7} \cdot (3 \cdot 10^8)^2 = 7,26 \cdot 10^{10} \text{J}$

La fission de 1g d'uranium libère donc une énergie de 72,6 milliards de Joules soit 20 000 kWh, c'est à dire la fourniture d'énergie pour 4 maisons (basse consommation) pendant 1 an.

Comparaison avec l'énergie libérée par la combustion du pétrole :

Le pouvoir calorifique du pétrole est de 42MJ/kg : la combustion de 1000 g de pétrole libère une énergie de 42 millions de Joules (soit 11,6 kWh) , alors que la fission de seulement 1g d'uranium libère 72,6 milliards de Joules.

72.6×10^9 Comparaison de ces deux énergies : $42 \times 10^6 = 1730$

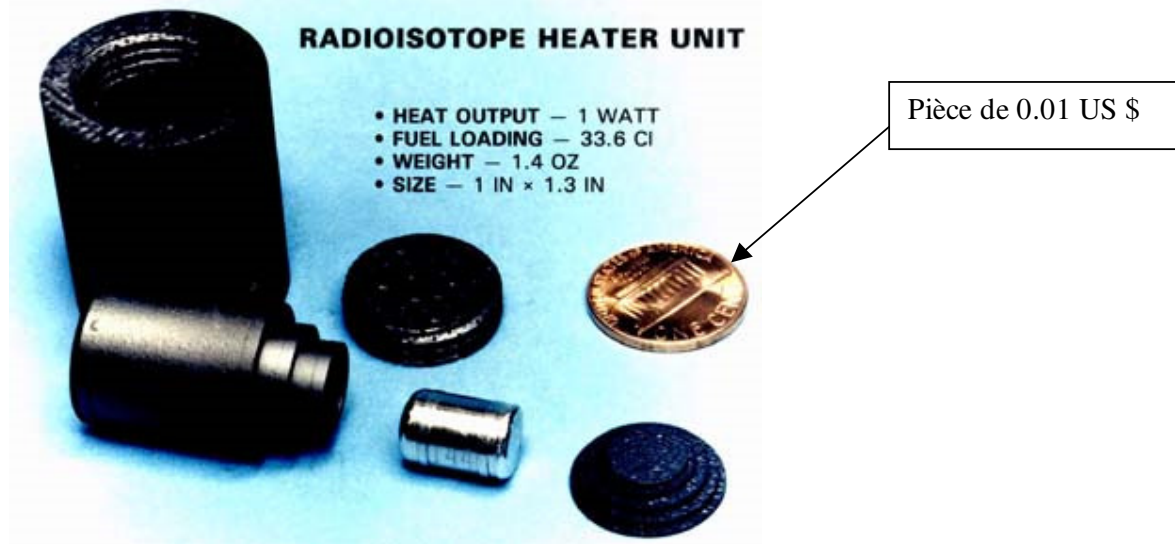
Finalement, d'un point de vue purement comptable, la fission de 1g d'uranium libère 1730 fois plus d'énergie que n'en fournit la combustion de 1000g de pétrole, ou, tout rapporté à un gramme de chaque combustible : 1 g d' U^{235} procure 1, 730 million fois l'énergie d'1 g de pétrole . Ce résultat doit néanmoins être modéré, comme on l'explique ci dessous.

Compléments et précisions :

Le calcul ci-dessus supposait, sans le dire, qu'on avait affaire à de l'uranium 235 pur (uranium avec 92 protons et $235-92 = 143$ neutrons). Mais l'uranium naturel ne contient en fait que 0,7% d'uranium 235 et 99,3% d'uranium 238 (donc avec $238-92 = 146$ neutrons) : or seul l'uranium 235 peut être fissionné. Pour des raisons techniques les centrales nucléaires actuelles utilisent de l'uranium naturel enrichi à environ 4% en uranium 235. Comparaison entre le combustible pétrole et le combustible uranium

Pour être plus réaliste on peut donc améliorer les calculs précédents en disant que sur 100 atomes il y en aura seulement 4 qui seront fissionnés et libéreront de l'énergie (les 96 atomes d'uranium 238 n'étant pas fissiles), ce qui fait que la fission de un gramme d'uranium enrichi libèrera non pas 7,26.10¹⁰ J mais 4% de cette valeur, soit 2,9.10⁹J. Au final le gramme d'uranium enrichi libèrera donc $2,9.10^9 / 42.10^6 = 69$ fois plus d'énergie que la combustion de 1000g de pétrole (et non 1730 comme on l'annonçait plus haut). Finalement ceci montre que l'énergie nucléaire est beaucoup plus concentrée que l'énergie chimique (**1g d'uranium enrichi libère 69 000 fois plus d'énergie que 1 gramme de pétrole**).

C'est une des raisons qui explique l'utilisation de l'énergie nucléaire dans les missions spatiales lointaines :

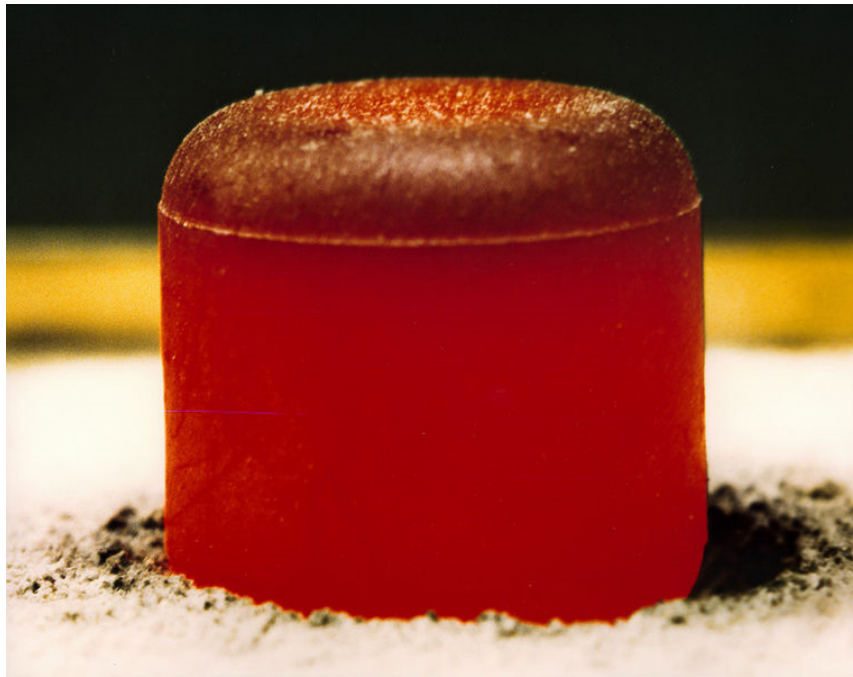


Ce n'était pas une raison pour que les soviétiques utilisent des micropiles à Plutonium pour leurs phares et balises maritimes.

Exemples concrets :

Roger Balian , membre de l'Académie des Sciences, écrit p 30 dans le livre « L'énergie de demain » (édition EDP sciences, Grenoble Sciences, livre rédigé par de multiples auteurs sous la direction du groupe énergie de la Société Française de Physique) qu'une centrale nucléaire de puissance 1000MW électrique consomme 27 tonnes d'uranium (enrichi à 3,2%) par an , qu'une centrale thermique de même puissance consomme 170 tonnes

de fuel (5100 tonnes d'air = 3 944 315 m³ d'air) ou 260 tonnes de charbon par heure, et qu'une centrale hydraulique de même puissance nécessiterait la chute de 100m de haut de 1200 tonnes d'eau par seconde! Cela dit, on ne prend pas en compte les déchets restants, ni le retraitement de ces déchets et la pollution des installations dans tous les cas.



Quelques grammes de Pu ²³⁸O₂ (dioxyde de plutonium238) chauffé à 700°C par sa propre désintégration
Pastille de combustible pour sonde spatiale d'une durée de ½ vie de 87,74 ans .

La puissance spécifique du Pu ²³⁸O₂ est de 567 W/kg. En 87 ans ce kg aura produit 830 090 MWh (ou 69174,166 tonnes de fioul) soit l'alimentation en énergie de près de 2000 maisons pendant ces 87.74 années.

Cependant pour une sonde ou un véhicule spatial, c'est juste ce qu'il faut pour sortir du système solaire. C'est aujourd'hui une source de recherche pour diminuer le temps de transport jusqu'à Mars avec les moteurs à plasma. Cela a été testé avec une des dernières sonde envoyée vers la lune.

Mais la fission nucléaire n'est pas la combustion du charbon ou du pétrole !

Dans une centrale nucléaire, la chaudière perd son nom pour s'appeler un réacteur. (comme dans la chimie)

En effet, ce qui contient la réaction nucléaire (le réacteur) doit permettre de confiner la réaction. C'est là que les choses se compliquent très nettement. Il est facile de comprendre que les particules émises lors de la désintégration ne s'arrêtent pas comme cela puisqu'elles se déplacent à la vitesse de la lumière ou presque. Pour arrêter le rayonnement alpha (l'hélium 4) qui voyage à 20 000 km/s une feuille de papier suffit. Pour arrêter le rayonnement bêta - (électrons) une feuille d'aluminium de quelques millimètres suffit. Pour arrêter le rayonnement bêta + (proton) dans un cas il est identique au rayonnement bêta- dans un autre cas il devient un rayonnement gamma.

Pour arrêter un rayon gamma ou un rayon X, le problème devient très difficile parce que dans ce cas on parle uniquement d'atténuation ou de demi-dose. Le plomb, l'acier, le béton, l'eau atténuent les rayons gamma. Pour arrêter un neutrons, qui n'est pas ionisant mais dont la masse et la vitesse "cassent" les atomes, il existe deux solutions : les neutrophages (bore et cadmium), les modérateur de vitesse : l'eau ou la paraffine. Donc, si la fission doit être arrêtée, des barres de bore vont être introduite dans le cœur pour modérer voire stopper la fission. Tout dépend de la vitesse d'introduction de ces barres et du moment d'intervention (cf Tchernobyl).

Ainsi on peut constater que contrôler une réaction nucléaire n'est pas simple, mais la contenir (la mettre dans un contenant) encore moins.

Imaginez tous ces milliards de neutrons, de protons, d'électrons, qui s'entrechoquent mais qui viennent aussi désintégrer les parois du contenant, c'est à dire le réacteur, mais aussi du contenant du contenant c'est à dire le béton qui contient le réacteur, et enfin le fluide caloporteur qui est généralement de l'eau.

Donc tout ce qui est atteint par les radiations est transmuté et le fluide caloporteur transporte aussi les éléments "mutagènes".

Pour un réacteur on va parler de bilan neutronique qui s'établit comme suit :

100 fissions d' U^{235} libèrent en moyenne 250 neutrons qui donnent lieu aux réactions suivantes :

- 100 neutrons provoquent 100 nouvelles fissions, entretenant ainsi la réaction en chaîne, et consommant 100 noyaux du matériau fissile ;
- 70 neutrons subissent des captures fertiles par 70 noyaux du matériau fertile ^{238}U , les transformant en autant de noyaux fissiles de ^{239}Pu ;
- 75 neutrons subissent des captures stériles, soit par des noyaux fissiles (30 neutrons) soit par des noyaux du réfrigérant, des structures du cœur, des éléments de contrôle ou des produits de fission ;
- 5 neutrons fuient hors du cœur (pour être capturés par des protections neutroniques).

Qui dit circuit de refroidissement dit fuites. Suivant les types de centrale ces fuites sont plus ou moins contrôlées.

Pour conclure, l'ultime produit de désintégration (voir la table de Mendeliev) c'est l'hydrogène. Il est le plus petit : 1 proton, un électron.. Or, rien de peut contenir l'hydrogène. On ne peut se contenter que de ralentir sa percolation des parois des conteneurs.

C'est avec ce critère qui décide de l'arrêt définitif d'une centrale nucléaire (non accidentée). En effet quand on commence à mesurer à l'extérieur de l'enveloppe de béton du réacteur nucléaire, des taux grandissant d'hydrogène. Cela indique que l'élément immédiatement plus gros (le deutérium (1 proton, 1 neutron, 1 électron) serait en cours de percolation et pourrait arriver. Lorsque celui-ci arriverait cela voudrait dire que le suivant qui est radioactif (le tritium : 1 proton, 2 neutrons, 1 électrons, émet des bêtas -) ne serait pas loin. De plus, lors de sa percolation, l'hydrogène modifie la structure cristalline des matériaux, induisant de fait une fragilisation de la structure allotropique par la création de nano-fissures inter-atomiques. (accident de St Fons en 1990 explosion de 4 réservoirs d'hydrogène de 400 litres chacun).

L'eau comme fluide de refroidissement :

Certaines centrales ont utilisé d'autres fluides que l'eau. En France (St Laurent des eaux A1 et A2, Bugey 1 (arrêté définitivement en 1994), Chinon (3 tranches), Marcoule,...cf Wikipedia liste des centrales nucléaires en France), en Angleterre (26 réacteurs), en union soviétique, des procédés ont utilisé le gaz carbonique.

Les sur-régénérateur comme Phénix et super-phénix ont utilisé du sodium fondu.

Concernant l'usage de l'eau comme fluide caloporteur est en soit un sujet difficile. L'eau utilisée doit être pure à 99,9999%.

Il faut, bien sûr, prendre en compte les quantités utilisées dans une centrale pour arriver à une telle précision.

Les réacteurs utilisent de l'eau légère, mais produisent de l'eau lourde. L'eau légère n'est formée que d'hydrogène et d'oxygène. L'eau lourde est formée des isotopes de l'hydrogène (tritium et deutérium) et d'oxygène.

L'eau a la caractéristique d'être amphotère , c'est à dire soit acide soit basique. Ceci dépend des éléments en solution. Ces éléments dissouts sont des ions.

La caractère amphotère de l'eau fait qu'elle peut basculer quasiment instantanément de l'acidité absolue (pH 0) à la basicité absolue (pH14). Le but est de la maintenir à un pH qui soit le plus neutre possible pour l'installation (pH 7) de façon à éviter les effets de piles entre les différents métaux constitutifs des circuits de refroidissement, mais aussi des perturbations hydrauliques sous l'effet de la circulation du fluide (cavitation, écoulements turbulents, etc...). Ceci est classique dans l'exploitation d'un circuit de refroidissement. Ainsi dans un simple moteur de voiture, l'eau de refroidissement est additionnée, outre l'antigel, de produits anticorrosion.

Dans le cas d'une centrale nucléaire, l'eau est soumise au rayonnement alpha, bêta, gamma et X qui sont ce qu'on appelle des rayons ionisants. Ces ions mutent conséquemment aux désintégrations dues aux neutrons. Donc l'exploitant de la centrale ne peut pas dissoudre n'importe quel élément dans l'eau.

Sur ce sujet, EDF avait été très discret lors de la rédaction de mon mémoire mais néanmoins on peut citer l'acide borique.

Néanmoins, il faut retenir que, lors d'une fuite, il n'y a pas que de l'eau qui sort et, que même l'eau, qui peut être lourde, est donc en conséquence radio-active.

Comment exploiter la chaudière ?

Il existe différents procédés.

UNGG dit Uranium naturel graphite gaz (cf ci-dessus) . Il n'est plus exploité en France, mais il a connu quatre incidents graves à St Laurent des eaux et Chinon . Ils sont en cours de démantèlement depuis plus de 16 ans et ces travaux ne sont pas terminés et à priori pas près de l'être.

BWR : Boiled water reactor: ce sont les réacteurs en cause actuellement au Japon. Ce sont les réacteur type RBMK (Reactor Bolchoe Molchnastie Kipiachie) dans l'ex union soviétique, dont Tchernobyl, dont 11 sont encore en service en Russie et 4 en Ukraine.

PWR : Pressured water reactor : réacteur à eau pressurisée. C'est une licence Westinghouse. Ce sont toutes les tranches actuellement en fonction en France. Elles équipent tous les navires à propulsion nucléaires de l'OTAN dont la France. La France a acheté la licence en 1969 et l'a amélioré avec la société Framatome qui est devenu Areva.

EPR : Evolutionary power reactor : 5 sont prévus en France, 1 est en construction en France et un autre en Finlande. Le chantier finlandais à près de 4 ans de retard. Le chantier Français cumule 3ans de retard.

Je n'insisterai que sur les BWR et PWR.

Ce qui fait la grande différence entre les 2 procédés tient dans les générateur de vapeur et la séparation des circuits de production de vapeur.

Ces cycles sont liés à la chauffe, la vaporisation, le réchauffage, la détente, la condensation de la vapeur.

Il répondent aux exigences liées aux propriétés physiques de l'eau qui sont décrites dans un diagramme appelé digramme de Mollier et que tout exploitant de centrale à vapeur (nucléaire ou à énergie fossile(gaz, charbon, fioul)) connaît. L'eau à un point critique qui est situé à une pression de 221.2 bars et 374.15 °C. Ceci veut dire qu'au delà de cette température l'eau ne peut plus être liquide et se trouve à l'état de vapeur surchauffée. La pression croît exponentiellement et de faite l'énergie interne.

Une centrale nucléaire ne se démarre pas comme un moteur diesel. Toutes les centrales au monde comprennent au moins deux réacteurs sinon plus. En cours d'exploitation normale, une centrale en fonctionnement permet le démarrage de la voisine pour :

- la fourniture de l'électricité nécessaire aux utilitaires : pompes, contrôle commande, dévirage des turbines (mise en rotation des turbines),...

- le vide partiel avant la mise en vapeur.

- la fourniture de la vapeur nécessaire au réchauffage de l'installation et du circuit de vapeur

- la vapeur nécessaire au premier de tour des turbines.

Dans le cas d'un arrêt total de toutes les tranches en même temps, ou dans le cas d'une surcharge réseau, les centrales sont équipées d'une "mini" centrale au fioul et de gros groupes diesel électrogènes pour la fourniture des "utilités" lesquels groupes doivent être mis en phase avant la connection.

Réacteur BWR (RBMK) :

C'est clairement une centrale plus simple et moins onéreuse que la centrale PWR avec un rendement un peu meilleur que le PWR.

C'est le même circuit qui passe dans le réacteur et dans les turbines. La vapeur est générée directement dans le cœur ou juste après.

Il faut distinguer le système BWR systématisé hors URSS et le système RBMK en URSS.

Le système BWR :

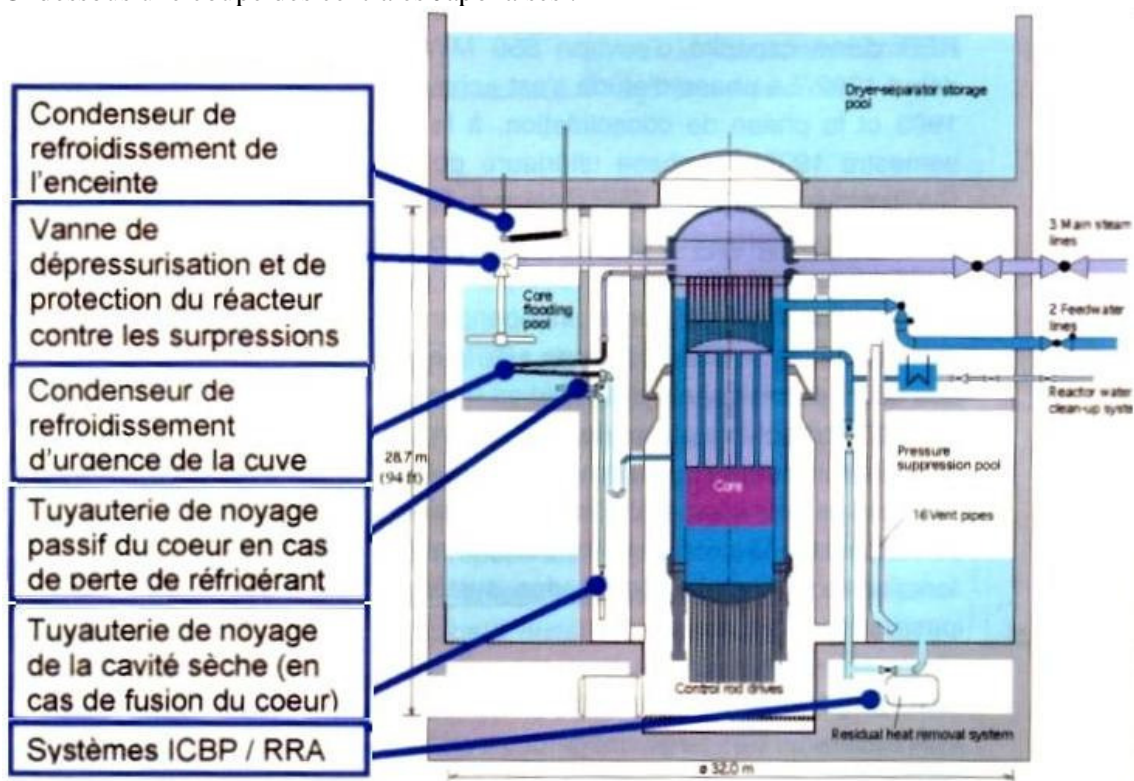
Le réacteur et le générateur de vapeur sont confinés dans une enceinte close. Le générateur de vapeur est en ligne avec le réacteur. Le défaut du système BWR tient dans les points suivants :

S'il y a une fuite dans le circuit de vapeur alimentant les turbines le niveau d'eau la pression baisse dans le réacteur et l'eau y bout. Il y a alors une variation d'échange (présence de bulles de vapeur) donc un accroissement de la température interne du réacteur. Mais il ne faut pas oublier, (cf infra) l'eau a un rôle modérateur de la fission d'où risque d'emballement de la fission s'il y a moins d'eau. Toute la sécurité du système repose sur la qualité du circuit de vapeur et du cycle de turbinage. (cf incident de Forsmark en Suède en 2006)

Pour donner un ordre de grandeur :

Une centrale de 1000 MW électrique (3900 MW thermique) voit passer dans le cœur de son réacteur environ 17.5 tonnes/seconde (17.5m³/s) à une pression de 70 bars (7Mpa) et à une température moyenne de 285.7°C.

Ci-dessous une coupe des centrales Japonaises :



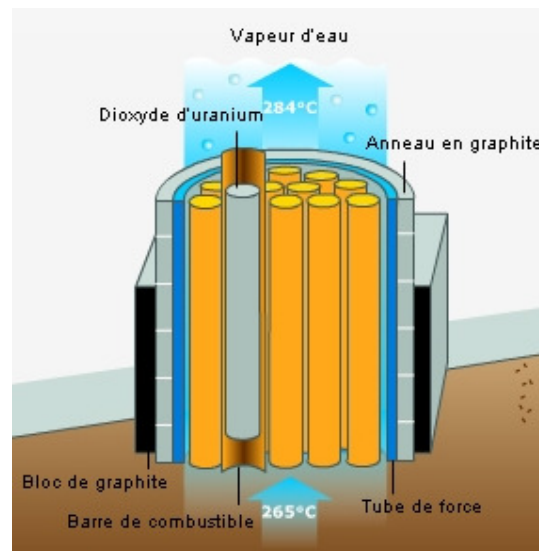
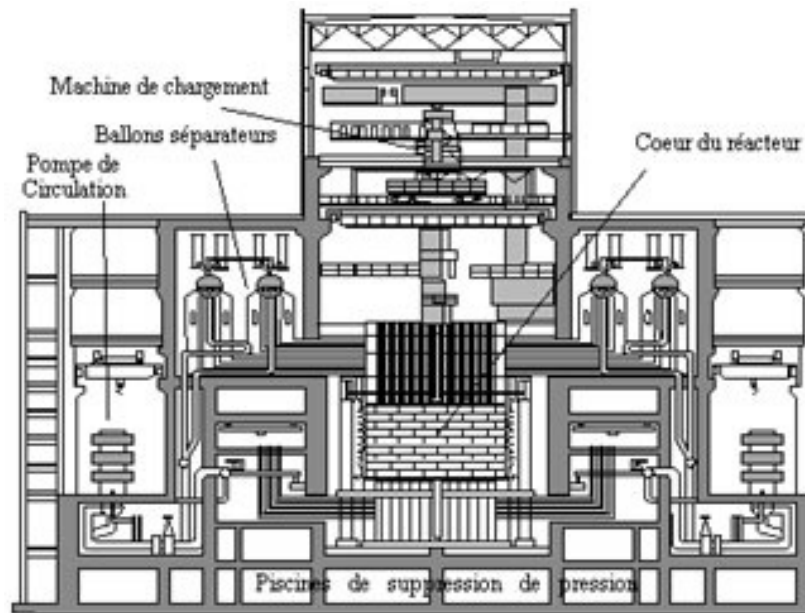
Comme on peut le constater sur le schéma ci-dessus, le réacteur possède une réserve d'eau en partie supérieure qui permet de le noyer et en partie inférieure il peut être alimenté par de l'eau sous pression. En ultime recours, le réacteur peut être directement alimenté en eau de pompage extérieure.

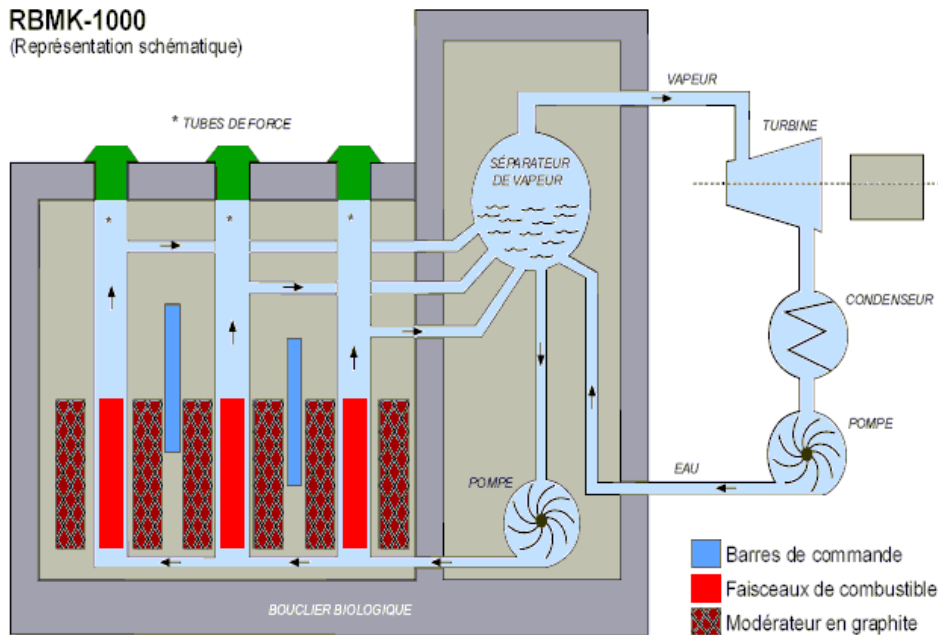
Néanmoins, l'eau borée (avec de l'acide borique) étant un modérateur puissant, l'absence d'eau pendant un laps de temps, même court, amène la fusion du cœur. Le produit de cette fusion est un magma, appelé Corium dont la température peut atteindre plusieurs milliers de degrés celsius. Assurément, le Corium peut percer l'enceinte de confinement et la dalle du socle. Comme rien ne peut plus alors stopper le mécanisme de formation du Corium, certains ont émis l'hypothèse, qu'il pourrait continuer la fusion au travers de l'écorce terrestre, avec une contamination au passage des nappes phréatiques, pour atteindre le manteau terrestre. Ne pas oublier que la charge en uranium d'un réacteur de 1000 MW est de 27 tonnes à 4% d'uranium 235. Aujourd'hui avec le combustible MOX (mélange d'oxydes), la teneur a augmenté avec l'addition de Plutonium.

A ce jour, au Japon, il est plus que probable, que le corium est atteint la partie inférieure de la dalle. (cf fin du paragraphe RBMK).

Le système RBMK :

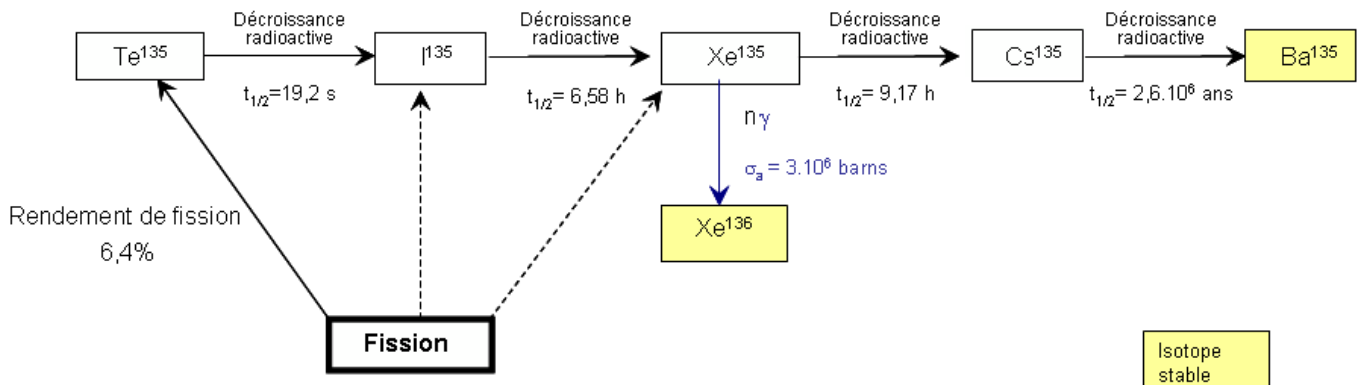
C'est 40% de l'énergie électrique de l'URSS.





Ce type de réacteur est celui de Tchernobyl.

Il fonctionne sur le même principe que le réacteur BWR mais avec des différences notablement dangereuses. Il n'y a pas d'enclume de confinement et pas de socle bétonné. Les modérateurs sont l'eau et le graphite. Les pompes du circuit de refroidissement sont, pour certaines, à vapeur ce qui induit une très grande instabilité au démarrage de l'installation. La vitesse de descente des barres de contrôle en bore est de 20 secondes (contre 2s pour un système classique). Il n'y avait pas de diesel de secours suffisant pour tous les auxiliaires. La chauffe initiale du réacteur et donc du circuit de vapeur est seulement assurée par le réacteur lui-même. Les phases de démarrage ou de variation de puissance sont encore plus délicates à conduire que les empoisonnement du réacteur au Xénon 135 (issu de la désintégration de l'iode 135) apporte des baisses significatives de puissance dans ces phases là.



Au démarrage d'un réacteur nucléaire, la concentration en ^{135}Xe est nulle. La concentration en xénon va progressivement augmenter (si le flux neutronique est constant) jusqu'à atteindre une valeur d'équilibre au bout d'un jour ou deux.

À l'arrêt du réacteur, la production d'iode ^{135}I s'arrête aussi, ainsi que la consommation du ^{135}Xe par la réaction σ . Le «réservoir d'iode ^{135}I » se transforme alors encore en ^{135}Xe (avec une demi-vie de 6h30). La demi-vie du

xénon¹³⁵ étant supérieure à celle de son père, le xénon¹³⁵ s'élimine nettement moins vite qu'il n'est formé : il commence alors par s'accumuler (augmentant ainsi l'anti-réactivité associée), jusqu'à ce que la source d'iode¹³⁵ se tarisse et que la désintégration propre du xénon¹³⁵ soit suffisante pour l'éliminer progressivement (avec une demi-vie de 9h). Le niveau du réservoir xénon passe ainsi par un maximum (au bout d'une dizaine d'heures), puis tend vers 0.

La concentration en xénon suit donc une dynamique paradoxale : une réduction de la puissance du réacteur entraîne (à l'échelle de l'heure) une augmentation transitoire du xénon, qui ne se réduit que dans un deuxième temps (à l'échelle de la journée).

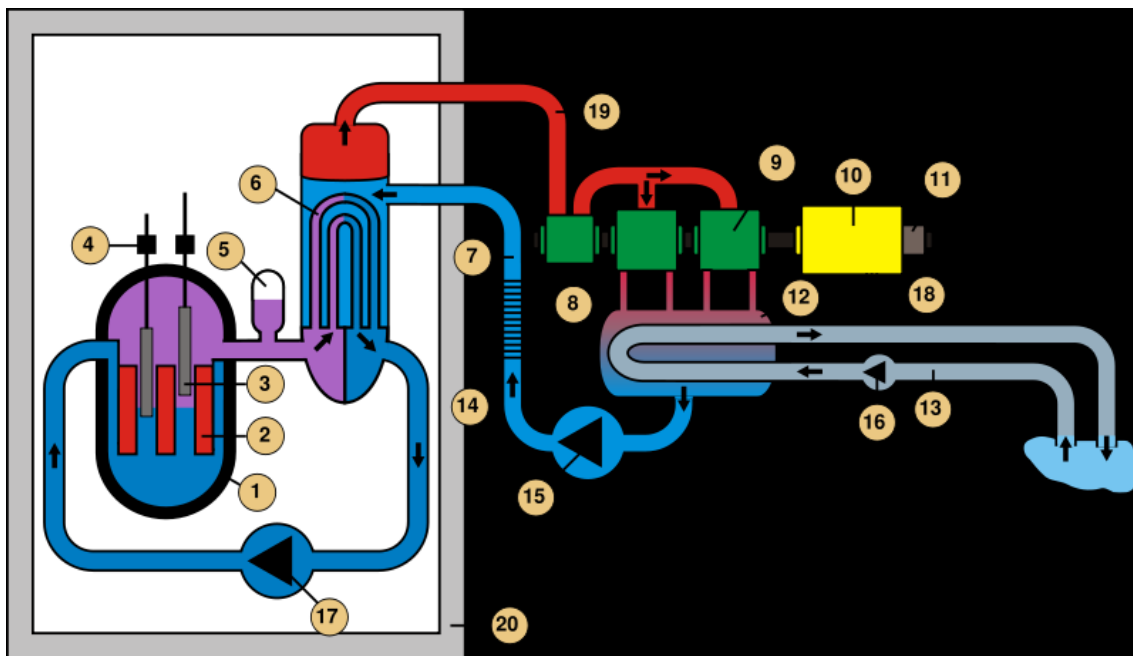
L'empoisonnement au ¹³⁵Xe fut à l'origine de la perte de contrôle du réacteur 4 de Tchernobyl. Après l'arrêt prolongé et la présence d'un pic de ¹³⁵Xe, les opérateurs ont relevé les barres de contrôle au delà de la limite autorisée pour donner un surcroît de puissance au démarrage alors que la conduite est instable aux faibles puissances. L'augmentation de puissance conduisit à détruire le xénon, ce qui eut pour effet d'augmenter la réactivité du réacteur trop rapidement pour permettre une reprise du contrôle.

L'URSS choisit ce type de réacteur par économie d'étude et de réalisation mais aussi par économie de fonctionnement avec un combustible moins riche en U²³⁵, et une production accrue de plutonium indispensable pour les armes nucléaires.

A Tchernobyl, des centaines de mineurs furent mobilisés, pour creuser sous la centrale afin d'éviter que le corium n'atteigne le sous-sol. Ils creusèrent un tunnel pour injecter du béton sous la centrale. Il y eut un corium mais limité puisque l'essentiel du combustible fut diffusé alentour lors de l'explosion. A ce jour, personne ne sait ou ne veut dire si le sous-sol fut atteint et si les nappes phréatiques furent atteintes.

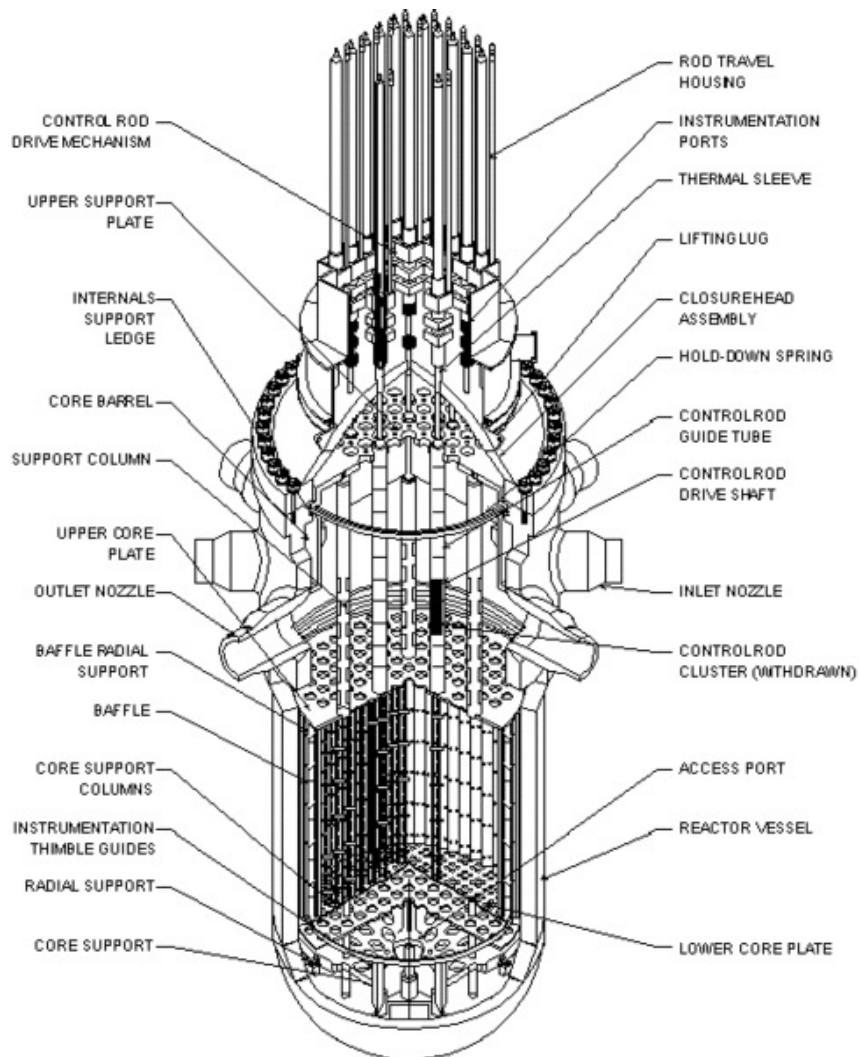
Les centrales REP (PWR) réacteurs à eau pressurisée (VVER en Russe):

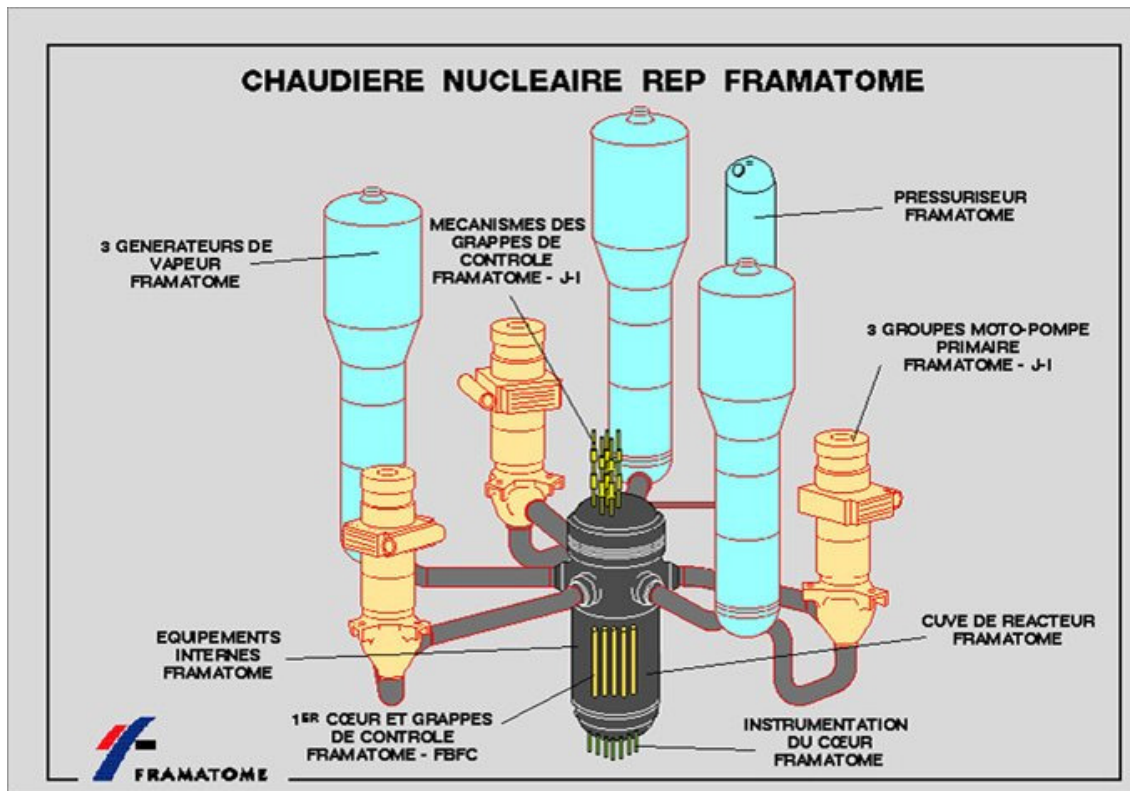
Elles sont la majorité des centrales françaises. C'est à l'origine un brevet Westinghouse développé pour les sous-marins nucléaires.



1. Cuve du réacteur en acier

2. Élément de combustible
3. Barre de commande ou de contrôle (de la réactivité)
4. Moteur de la barre de commande (ou de contrôle)
5. Pressuriseur situé dans le circuit primaire
6. Tube en U inversé du générateur de vapeur (GV) (le GV, un échangeur de chaleur, en compte des milliers)
7. Eau d'alimentation
8. Turbine haute pression (HP)
9. Un des corps de la turbine basse pression (BP)
10. Alternateur
11. Excitatrice
12. Condenseur (échangeur de chaleur)
13. Eau froide du circuit de refroidissement
14. Pré-réchauffeur
15. Turbopompe alimentaire (circuit secondaire)
16. Pompe de circulation à eau froide (circuit de refroidissement)
17. Pompe primaire centrifuge de l'eau traitée (borée) (circuit primaire)
18. Raccordement au réseau électrique
19. Vapeur du circuit secondaire
20. Enceinte de confinement en béton, mise en dépression





Framatome était le prédécesseur d'AREVA.

Le cycle d'un REP a un rendement faible (maximum 36%, en moyenne 30%) comparativement à une centrale thermique classique à combustible fossile (proche de 47%).

Le cycle classique d'une centrale à vapeur est un cycle de Rankine avec 3 turbines : une haute pression, une moyenne pression, une basse pression.

La différence de rendement entre les 2 types de centrales est dû à la température et la pression d'entrée dans la turbine HP qui est de l'ordre de 350 °C et 70 bars maximum dans une centrale nucléaire contre 650 °C et 150 bars dans une centrale à énergie fossile ou biogaz.

Il serait possible d'améliorer le cycle d'une centrale nucléaire, principalement avec une source d'énergie supplémentaire comme les biogaz ou l'énergie géothermique.

De même l'énergie relâchée à la source froide pourrait être utilisée pour le chauffage urbain, mais EDF y met un veto absolu. Pour 1 000 MW électriques produits, il y a 1 800 MW thermiques relâchés à la source froide soit 180 000 logements. Par exemple la centrale du Bugey, c'est 3 724 MW électrique c'est à dire 6703 MW thermiques soit 670 000 logements, quasiment toute l'agglomération lyonnaise.

Pourquoi ce veto?

L'argument "massue" est que le métier d'EDF est de vendre de l'électricité et non de la chaleur, que les canalisations ne seraient pas rentables,...etc.

La vraie raison n'est pas celle-là. Malgré les 3 circuits indépendants, il arrive que les générateurs de vapeur fuient et larguent des produits de fission dans le circuit de vapeur turbiné. Le 3^{ème} circuit, à la source froide, est lui aussi perméable parce qu'il est soumis à la corrosion. Si les doses de produits radioactifs qui sont relâchés dans la nature restent dans des limites peu observables, il n'en serait pas de même avec un circuit fermé alimentant des maisons dans lesquels il y aurait obligatoirement des zones d'accumulation de radioéléments. Quelque part, EDF préfère réchauffer les fleuves ou la mer.

Les zones sismiques de la France métropolitaine

Les alpes et la Provence

L'activité sismique des Alpes est liée à la déformation de la marge de la plaque Européenne. Au nord, une bande sismique s'étend sur 50 km de large depuis Chamonix jusqu'à Valence. Cependant, toute cette zone provençale est peut-être actuellement le siège d'une lacune sismique, c'est-à-dire une zone reconnue comme sismique autrefois mais dont l'activité sismique est relativement faible aujourd'hui. Ceci impose une surveillance particulière d'autant que la densité de la population a beaucoup augmentée ces dernières décennies. Au sud, jusqu'à la Méditerranée, de Marseille à Cannes, la sismicité est nulle. On y ressent néanmoins des séismes dont les foyers se situent plus à l'Est, à partir de Nice en direction de l'Italie (cela correspondrait à la limite des plaques Afrique et Europe). Enfin, on observe une activité assez régulière et importante dans le Queyras et l'Ubaye mais également dans les régions internes des Alpes et notamment dans le Briançonnais.

La vallée du Rhône

A l'Ouest des Alpes, de Valence jusqu'en Provence occidentale et jusqu'en bordure du Massif Central, la vallée rhodanienne est une zone de rift datant de 25 Ma, et donc à l'origine d'une ligne sismique allant du Tricastin jusqu'à Cavailon et Nîmes. La région de Montélimar a connu plusieurs séismes qui ont atteint l'intensité VIII (1772-1773, 1873 et 1901). Cette zone a été l'objet d'une surveillance accrue suite à l'installation de centrales nucléaires.

Les Pyrénées

La chaîne des Pyrénées s'est formée suite au grand coulissage qui s'est produit voilà 100 Ma le long de la faille nord-pyrénéenne, déplaçant l'Espagne vers l'Est, suivi par un déplacement vers le Nord de cette dernière. L'activité sismique est importante et assez homogène le long de l'axe. Elle est surtout concentrée dans certaines zones comme Arette, Arudy et Saint-Paul de Fenouillet qui a connu en le 18 février 1996 le plus fort séisme français depuis 40 ans (MS = 5.6), la Bigorre, Bagnères-de-Luchon et le massif de la Maladetta, Andorre. Actuellement, le Roussillon a une activité sismique faible, ce qui n'a pas été toujours le cas dans le passé avec notamment le séisme de Catalogne de 1428 qui a fait de gros dégâts. On pourrait donc croire à une phase de lacune sismique.

Le fossé rhénan et l'Auvergne

Ce sont des régions en extension avec des rifts intracontinentaux datant de 30 Ma (oligocène) associés à du volcanisme (Kaiserstuhl à l'Est de Colmar; volcans d'Auvergne). La sismicité n'est pas très élevée actuellement, mais dans le passé la région a subi de fortes secousses comme le séisme de Bâle de 1356 (intensité X). Près de Clermont-Ferrand, deux séismes d'intensité VIII se sont produits en 1477 et 1490. Depuis quelques années, le Livradois (région montagneuse d'Auvergne) connaît une certaine activité sismique.

Massif armoricain, Massif central occidental, Vosges

Ces massifs correspondent à l'ancienne chaîne hercynienne (300 Ma). La sismicité est régulière mais assez diffuse. Le séisme le plus marquant est sans doute celui de Remiremont dans les Vosges en 1682. Des séismes plus récents ont eu lieu au Sud de la Bretagne (1930 dans le Morbihan; 1959 près de Quimper), à l'île d'Oléron (1972), à l'Ouest du Contentin (1926) ainsi que les deux crises qui ont secoué en 1977 les régions d'Eguzon (Indre) et de Cosne d'Allier.