

Autres types de centrales nucléaires

Comment l'électricité est produite - Centrales thermiques nucléaires

Ce texte est conçu comme un document compagnon du livre « L'électricité, au cœur de notre futur bas-carbone ». Il n'est pas conçu comme un document indépendant. Il complète le chapitre mentionné ci-dessus.

Les centrales à eau bouillante : description et fonctionnement

Description générale

Contrairement aux REP qui ont trois circuits, les réacteurs à eau bouillante, REB, en ont seulement deux¹, la vapeur étant créée directement dans le circuit primaire.

Comme illustré par la Figure ci-dessous :

- Le circuit primaire, fermé, inclut le réacteur. Le cycle de l'eau est diphasique : une partie de l'eau y est à l'état liquide et une autre à l'état vapeur. L'eau bout dans la cuve elle-même.
- Le circuit secondaire est le circuit de refroidissement du condenseur. Comme pour les autres centrales thermiques, suivant les sites, il est ouvert, semi-ouvert ou fermé.

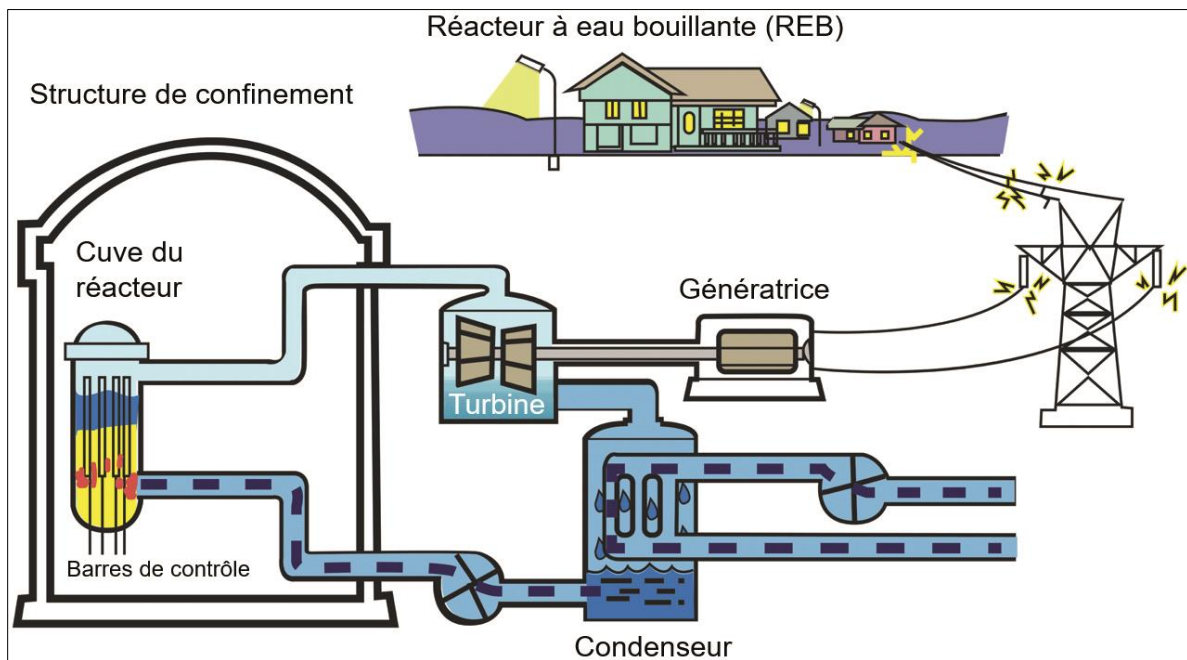


Fig.1 Schéma d'une centrale à réacteur à eau bouillante (REB) / nrc.gov

¹ Conceptuellement, rien n'empêche de mettre un circuit intermédiaire entre le circuit primaire et le circuit de refroidissement ; c'était d'ailleurs le cas pour les premiers REB.

La configuration d'un REB, sans générateurs de vapeur ni pressuriseur, donc sans les complexités associées, est plus simple que celle d'un REP. Par contre, le circuit primaire est partiellement en dehors de l'enceinte de confinement du réacteur : la vapeur du circuit primaire, toujours légèrement radioactive, circule dans les turbines. La gestion de l'eau du circuit primaire est donc plus délicate que pour un REP, en fonctionnement comme pour la maintenance². Ceci conduit, comme l'illustre la Figure suivante, à mettre le bâtiment contenant le réacteur et celui contenant turbines et génératrices l'un contre l'autre.



Fig.2 Centrale REB de Leibstadt, 1 200 MW (Suisse) / © kkl.ch

Le rapport entre l'énergie électrique produite et l'énergie thermique produite dans le réacteur, est entre 33 et 36 % pour les REB actuels, i.e. légèrement plus que pour les REP.

Le réacteur et le circuit primaire

Les REB utilisent de l'uranium enrichi au même taux que les REP. Ils fonctionnent dans le même domaine de température : la vapeur sort de la cuve à une température de l'ordre de 300 °C. Par contre, la pression est entre 75 et 80 bars, soit la moitié de celle des REP, pour que l'eau puisse bouillir. En traversant la cuve vers le haut, l'eau se vaporise partiellement. La vapeur humide est séchée en haut de la cuve avant de partir vers les turbines. Après s'y être détendue, elle se liquéfie dans le condenseur puis revient donc sous forme d'eau vers la cuve. L'eau, qui avait été séparée de la vapeur et renvoyée vers le bas le long des parois de la cuve, rejoint l'eau issue du condenseur et repart avec elle dans le cœur.

² Les opérateurs ont donc besoin d'un équipement de protection pour aller en salle des machines pendant le fonctionnement.

Pour éviter les montées en pression excessives de la vapeur dans le haut de la cuve, des soupapes libèrent la vapeur en excès. Cette vapeur se condense et est récupérée.

La régulation de la réaction en chaîne se fait par deux moyens complémentaires :

- Des barres de contrôle, placées ici sous la cuve (car la vapeur serait trop corrosive si on les mettait en haut), et qui sont mues par un dispositif de pression hydraulique vu que la gravité joue à l'encontre de la pénétration des barres ;
- La régulation du débit de l'eau dans le cœur, via des pompes, situées suivant les modèles dans ou hors de la cuve. Diminuer le débit augmente la quantité de bulles de vapeur et ralentit donc moins de neutrons. Ils sont alors moins absorbés ce qui ralentit la réaction en chaîne, et inversement.

Les réacteurs à eau lourde (CANDU)

CANDU signifie « Canada Deuterium Uranium ». Développée au Canada dans les années 1950, cette filière a l'avantage d'utiliser l'uranium naturel et ne nécessite donc pas d'usine d'enrichissement de l'uranium. Comme l'uranium naturel contient peu d'atomes fissiles, on veut modérer les neutrons tout en limitant leur absorption par le modérateur. C'est pour cela que l'on remplace l'eau H₂O par de l'eau lourde³ : elle est moins absorbante pour les neutrons, les atomes de deutérium en ayant déjà un, contrairement aux atomes d'hydrogène. Il faut donc une usine de production d'eau lourde.

L'eau lourde est utilisée comme caloporteur et comme modérateur. Comme elle est aussi moins modératrice que l'eau usuelle, les éléments combustibles doivent être plus distants pour que les neutrons soient ralentis, ce qui conduit à un cœur plus gros que pour les REP et REB. Par ailleurs, ces éléments s'épuisent plus vite que les éléments combustibles enrichis et doivent donc être remplacés plus souvent. Ceci a conduit à une conception où le combustible peut être remplacé sans arrêt du réacteur. Pour ce faire, la cuve est remplacée par un ensemble de tubes, dits tubes de force, contenant chacun des éléments combustibles accessibles de façon indépendante.

Les réacteurs CANDU en service en 2018 ont une puissance installée comprise entre 100 et 900 MW électriques. La majorité des sites sont au Canada et en Inde. Pour plus de détails, on peut consulter, entre autres, le site de l'association nucléaire canadienne [cna.ca] ou celui de la compagnie nationale indienne d'électricité [npcil.nic.in].

Les réacteurs rapides au sodium

Dans ces réacteurs, comme leur nom l'indique, on ne cherche pas à « modérer », c'est-à-dire ralentir, les neutrons. En utilisant comme combustible du plutonium 239, créé par fission dans les réacteurs REP ou REB, on valorise ce dernier. En outre, comme la fission d'un atome de plutonium produit en moyenne trois neutrons et qu'on ne modère pas ceux-ci, une proportion significative d'entre eux sort du cœur sans avoir été capturé. Si on place autour du cœur un « blindage » en uranium 238, les neutrons qu'il reçoit vont le transformer progressivement en plutonium 239. Autrement dit, on consomme du plutonium et on en produit. Suivant les proportions de plutonium et d'uranium, on peut avoir un réacteur qui consomme le plutonium, ou qui en produit autant qu'il en consomme, voire qui en produit plus qu'il n'en consomme. On parle alors de surgénérateur. Ceci permet non seulement d'utiliser

³ Le Deutérium est un isotope de l'hydrogène, découvert par **Harold Urey**, physicien et chimiste américain qui a reçu le prix Nobel de Chimie en 1934. Alors que le noyau de l'hydrogène ne contient qu'un proton, celui du deutérium, désigné D ou ²H, contient aussi un neutron. L'eau lourde, D₂O, est plus lourde que l'eau « légère », H₂O – poids atomique de 20 (2 x 2 + 16) au lieu de 18, d'où son nom. Présente en très faible proportion dans l'eau, elle peut en être extraite par distillation, par électrolyse ou par réaction chimique.

le plutonium mais aussi d'utiliser l'uranium 238 fertile qui n'est que peu utilisable dans les REP et les REB. On multiplie ainsi par un facteur de plus de 50 la valorisation des ressources naturelles d'uranium.

Pour ces réacteurs, le sodium liquide est le caloporteur. Il n'y a pas de modérateur puisqu'on ne cherche pas à modérer ! Les avantages du sodium sont : (a) qu'il absorbe et ralentit peu les neutrons, (b) qu'il reste liquide à la pression atmosphérique de 98 °C à 883 °C, ce qui permet d'éviter de faire un réacteur pressurisé, (c) qu'il a une capacité calorifique importante, ce qui assure une bonne inertie thermique du réacteur. Par contre, le sodium réagit vivement à l'air et à l'eau, ce qui nécessite des précautions vis-à-vis de la moindre fuite. En outre, il est opaque ce qui rend les inspections plus difficiles que dans l'eau.

Comme le montre la Figure ci-dessous, pour réduire les risques dus à une éventuelle fuite de sodium, le sodium du circuit primaire, chauffé par le cœur, donne sa chaleur via un échangeur intermédiaire à un circuit secondaire de sodium, qui lui-même transmet sa chaleur à de l'eau qu'il vaporise dans un générateur de vapeur. Ainsi, le sodium qui échange sa chaleur avec l'eau n'est a priori pas radioactif. Suivant les modèles, l'échangeur intermédiaire est à l'intérieur de la cuve, comme sur la figure, ou à l'extérieur.

Les réacteurs rapides au sodium sont les précurseurs d'une des familles possibles de la Génération IV. Le rendement de ces réacteurs, dont le fonctionnement est à environ 550 °C, est de l'ordre de 40 %, donc supérieur à celui des REP et REB.

Cette technologie a d'ores et déjà fait l'objet de plus d'une dizaine de réacteurs expérimentaux pour produire de l'électricité dans plusieurs pays. À fin 2018, selon l'Agence Internationale de l'Énergie Atomique [iaea.org], trois réacteurs de ce type étaient en fonctionnement, totalisant 1 400 MW: deux en Russie et un en Chine.

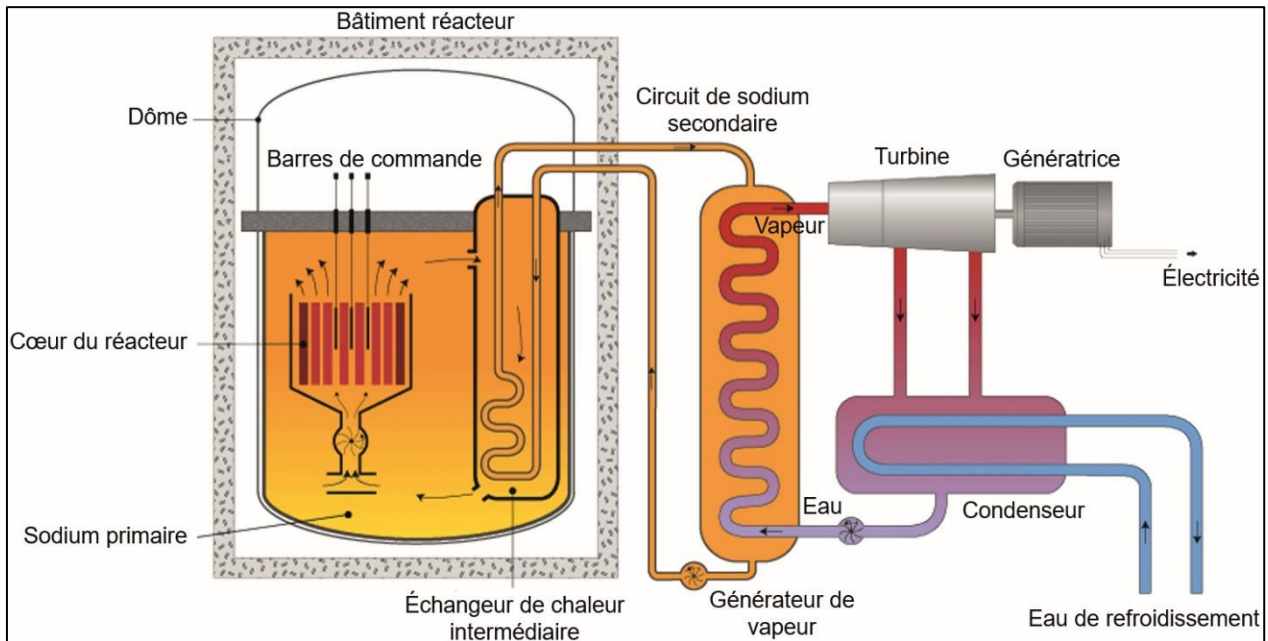


Fig.3 Schéma d'une centrale à réacteur rapide au sodium / © connaissance des energies.org