

Annexe 3

Les réacteurs à eau légère (ou ordinaire)

Réacteurs à eau pressurisée (REP) et réacteurs à eau bouillante (REB)

Bertrand Barré

Généralités

Un réacteur nucléaire est une machine dans le *cœur* de laquelle on entretient et contrôle une réaction de fission en chaîne. La chaleur dégagée par cette réaction est utilisée, *via* un fluide *caloporteur*, pour faire bouillir de l'eau. La vapeur produite se détend dans une turbine qui entraîne un alternateur pour produire de l'électricité.

La puissance du réacteur est contrôlée en ajustant dans le cœur la concentration de « poisons » qui absorbent les neutrons.

Comme celui de toute machine thermique, le fonctionnement un réacteur nucléaire nécessite une source chaude, son cœur, et une source froide, mer ou rivière. Pour ne pas trop réchauffer les rivières, on utilise souvent des *aéroréfrigérants* où une partie de l'eau est évaporée.

Chaque fission d'un noyau lourd, uranium ou plutonium, donne naissance à deux fragments, dont l'un au moins est radioactif, qui se désintègrent au rythme de leur période en produisant des descendants successifs jusqu'à aboutir à un noyau stable. Chaque désintégration dégage une énergie significative, quoique très inférieure à l'énergie d'une fission. L'ensemble des fragments de fission et de leurs descendants présents dans le combustible s'appellent *produits de fission*. Ces produits de fission constituent l'essentiel des déchets nucléaires.

Lorsqu'on arrête la réaction en chaîne dans le cœur d'un réacteur nucléaire, l'ensemble des produits de fission continue à se désintégrer en dégageant de la chaleur, appelée *puissance résiduelle*. C'est la différence fondamentale entre un réacteur nucléaire et les autres centrales thermiques : après l'arrêt de la fission, il est absolument nécessaire de *continuer à refroidir le cœur* pour évacuer cette puissance résiduelle.

1. Les réacteurs à eau ordinaire

La grande majorité des réacteurs nucléaires en fonctionnement dans le monde utilisent comme caloporteur de l'eau ordinaire, qui joue un double rôle : extraire les calories produites par les fissions et ralentir les neutrons pour augmenter leur probabilité d'être absorbés dans les *assemblages combustibles* qui constituent le cœur, et d'y produire des fissions. En cas de perte d'eau, par fuite ou ébullition excessive, les neutrons sont moins bien *modérés*, et la réaction en chaîne s'étouffe spontanément. Ce même étouffement spontané se produit si la température du cœur s'élève exagérément.

Le combustible de ces « réacteurs à eau ordinaire », REO, est formé de pastilles céramiques d'oxyde d'uranium légèrement enrichi en uranium 235 ou d'oxyde mixte d'uranium et de plutonium (MOX). Ces pastilles sont empilées dans des *gaines*, longs tubes scellés faits d'un alliage métallique à base de zirconium, pour constituer des *crayons* combustibles. Ces crayons sont assemblés en faisceaux que l'on appelle assemblages. Le cœur est contenu dans une *cuve* en acier épais, fermée par un *couvercle*.

Le zirconium absorbe très peu les neutrons et résiste particulièrement bien à la corrosion par l'eau très chaude. Mais, à haute température, il « ballonne » sous la pression interne des gaz de fission et, vers 1 200 °C, s'amorce une réaction exothermique de réduction de la vapeur d'eau par le zirconium, réaction qui dégage de l'hydrogène.

Les REO, se répartissent en deux familles, suivant qu'ils fonctionnent en cycle direct ou en cycle indirect de production de vapeur.

2. Les réacteurs à eau sous pression

Dans les réacteurs « à eau sous pression », REP, qui constituent notamment la totalité du parc électronucléaire français, le cœur est refroidi par de l'eau à haute température, maintenue liquide sous haute pression par un *pressuriseur* à bulle de vapeur. Sous l'action de *pompes primaires*, cette eau circule en circuit fermé dans un *circuit primaire* en acier épais et traverse un échangeur de chaleur appelé *générateur de vapeur* où elle cède ses calories pour porter à ébullition l'eau d'un circuit secondaire.

La vapeur sous pression produite, côté secondaire, dans le générateur de vapeur va se détendre dans un ensemble de turbines couplées à un alternateur, puis se re-condense dans un *condenseur* traversé par des tubes où circule l'eau de la source froide, mer ou rivière. L'eau condensée est alors renvoyée en circuit fermé dans le générateur de vapeur par des *pompes secondaires* (figure 1). Les « poisons neutroniques » qui permettent de contrôler la réaction en chaîne sont sous deux formes : de l'acide borique dilué dans l'eau du circuit primaire et des *grappes* de crayons absorbants qui peuvent être plus ou moins insérés dans les assemblages. Ces grappes sont actionnées par des mécanismes placés en haut du couvercle.

L'ensemble du circuit primaire est contenu dans un grand bâtiment en béton résistant, *l'enceinte de confinement* (souvent double), qui sert de *barrière* ultime pour confiner la radioactivité si un certain nombre de gaines (première barrière) ne sont plus étanches et qu'il y a des fuites sur le circuit primaire (deuxième barrière).

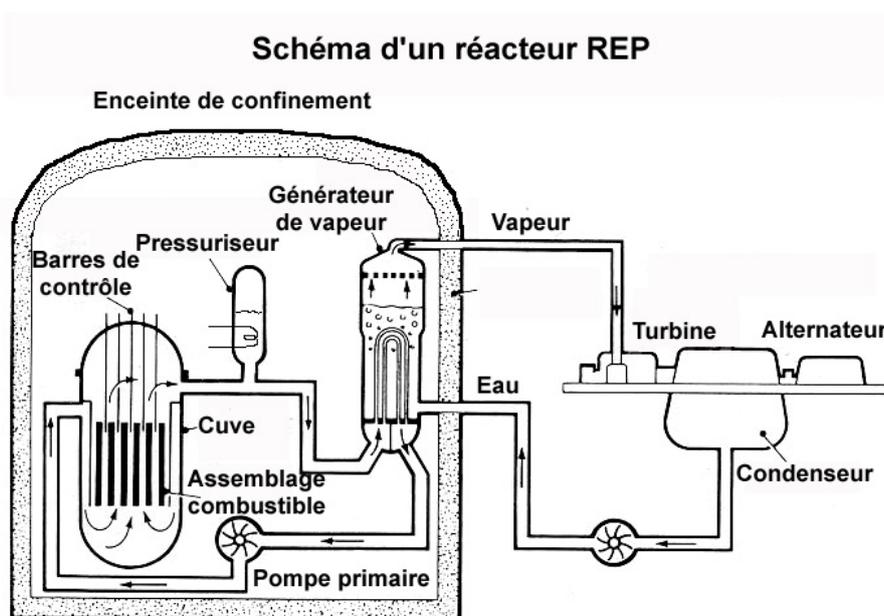


Figure 1 – Schéma d'un REP.

3. Les réacteurs à eau bouillante

Dans les réacteurs « à eau bouillante », REB, il n'y a qu'un seul circuit principal : à la sortie du cœur, l'eau contient une proportion de vapeur qui dépend notamment du niveau de puissance. Cette vapeur, débarrassée par des organes (*séparateurs* et *sécheurs*) situés dans la cuve au-dessus du cœur des gouttelettes liquides qu'elle a pu entraîner, va directement entraîner le groupe turbines-alternateur avant de se condenser dans un condenseur analogue à celui des REP et d'être renvoyée au bas du cœur. La partie de l'eau restée liquide est aussi réinjectée en bas du cœur par une *boucle de recirculation*.

Du fait de la présence au-dessus du cœur des séparateurs et sécheurs, les REB n'emploient pas d'acide borique en marche normale (de peur des colmatages possibles après l'évaporation), et les *croix* de poison mobiles doivent être introduites par le fond de la cuve. En revanche, les REB ont un autre moyen de modifier la réactivité du cœur en changeant le débit de recirculation, ce qui modifie le rapport eau/vapeur en partie haute du cœur, et donc l'efficacité du ralentissement des neutrons et de leur absorption par l'uranium 238.

Comme les REP, les REB ont *trois barrières emboîtées* pour confiner les produits de fission : la gaine, l'enveloppe du circuit principal et une enceinte de confinement. Contrairement aux REP, l'enceinte de confinement n'est pas le bâtiment réacteur lui-même : c'est une structure plus petite qui englobe la cuve et la ou les boucle(s) de recirculation. En temps normal, l'atmosphère de l'enceinte est « inertée » par de l'azote pour éviter une explosion en cas de relâchement d'hydrogène. L'enceinte en béton est fermée par un couvercle en acier que l'on doit démonter pour accéder à la cuve et décharger le combustible. Si les REP n'ont guère changé d'architecture depuis la fin des années 1960, *les REB ont connu des évolutions très significatives*, essentiellement dues à des changements dans le système de recirculation. Nous ne décrivons ici que l'architecture « Mark 1 », celle des réacteurs 1 à 5 de la centrale Fukushima 1 (figure 2).

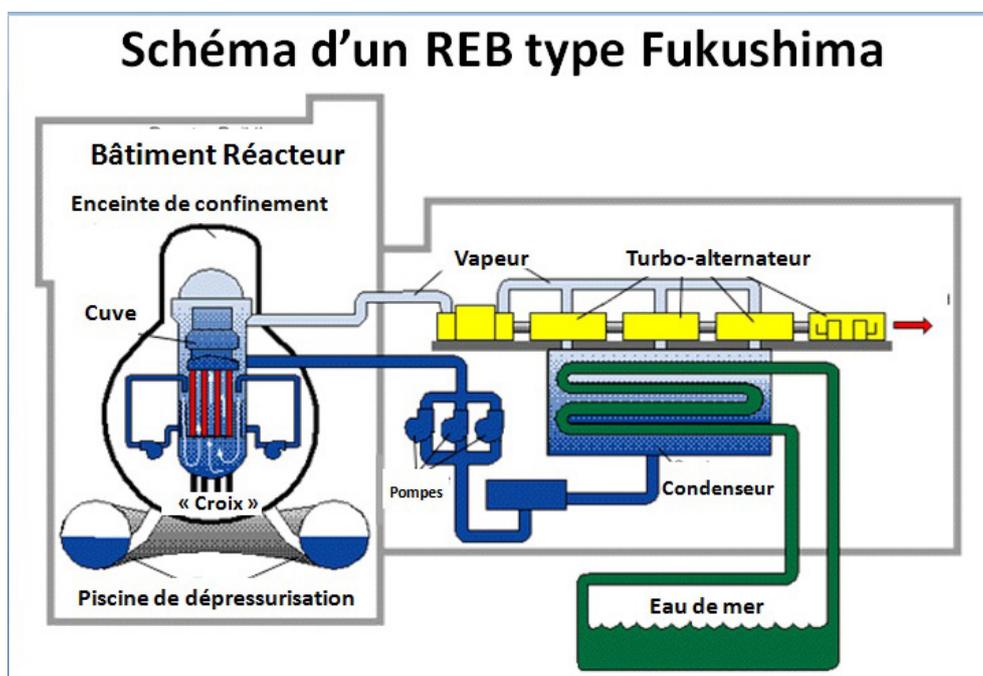


Figure 2 – Schéma d'un réacteur à eau bouillante type GE Mark 1.

En cas de surpression dans la cuve, des soupapes relâchent de la vapeur dans *une piscine de dépressurisation* de forme torique, située sous l'enceinte de confinement. Cette piscine est à moitié remplie d'eau liquide qui condense la vapeur relâchée. Si la pression monte trop dans le tore, la vapeur (ou les gaz incondensables qui l'accompagnent) est dirigée vers l'enceinte. Enfin, pour protéger l'intégrité de l'enceinte, l'opérateur peut procéder à un relâchement vers la cheminée extérieure¹.

L'enceinte est logée dans la partie basse, en béton, du bâtiment réacteur dont la partie haute, en structure légère sur poutrelles d'acier, sert de hall de manutention et abrite la piscine où l'on entrepose les assemblages combustibles usés après déchargement du cœur (figure 3). Cette piscine aussi doit être refroidie pour évacuer la puissance résiduelle de ces assemblages.

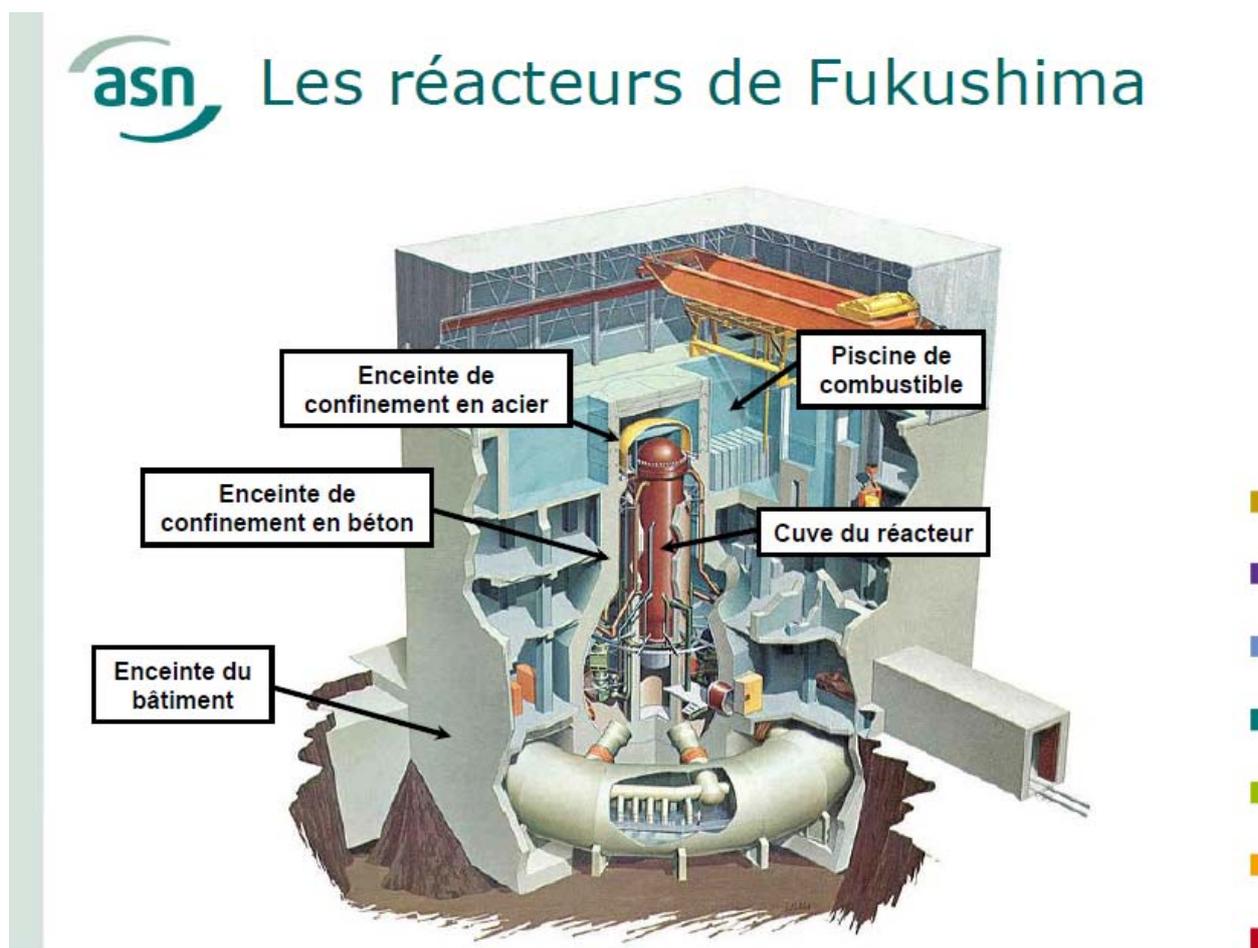


Figure 3.

¹ Lors de l'accident de Fukushima, des difficultés de niveau de radiation et d'accessibilité ont gêné l'ouverture des vannes de dépressurisation, actionnées par moteur électrique ou air comprimé, et les gaz en surpression dans l'enceinte de confinement ont fui vers le haut du bâtiment réacteur.