

Principes et physique des réacteurs nucléaires

Enseignants BTS Environnement Nucléaire

eric.royer@cea.fr

Module 1, 09-12 juillet 2012

Résumé

Ce cours s'intègre dans le premier module de la formation des enseignants au BTS Environnement Nucléaire qui vise à fournir les connaissances générales sur l'énergie nucléaire.

Afin d'expliquer le fonctionnement d'un Réacteur à Eau Pressurisée, plusieurs étapes sont nécessaires :

- positionner l'énergie nucléaire dans le *mix* énergétique mondial,
- expliquer le principe de la réaction en chaîne,
- justifier les conditions de fonctionnement nominal,
- identifier les aspects limitants du dimensionnement et les évolutions possibles du REP.

Table des matières

I	Introduction générale au nucléaire	4
1	Réponse aux besoins énergétiques	4
1.1	Evolution de la demande	4
1.2	Pré-dominance des énergies fossiles	4
1.3	Contribution de l'énergie nucléaire	5
1.4	Coûts de production	5
2	Physique nucléaire et réaction en chaîne	6
2.1	Noyau atomique	6
2.2	Fusion nucléaire	6
2.3	Fission nucléaire	7
2.4	Réaction en chaîne	7
2.5	Ralentissement	9
2.6	Radio-activité	10
3	Principales options de conception	12
3.1	Cœur	12
3.2	Réfrigérant	12
II	Réacteurs (passé, présent, avenir)	13
4	Histoire et filières de réacteurs	13
4.1	Découvertes fondamentales	13
4.2	Projets pionniers	13
4.3	Parc actuel	14
4.4	Génération futures	14
4.5	Panorama des filières	16
5	Réacteur à Eau sous Pression	19
5.1	Description d'ensemble	19
5.2	Cœur	19
5.3	Conversion d'énergie	20
5.4	Conditions de fonctionnement	20
6	Réacteur à Eau Bouillante	25
6.1	Vue d'ensemble	25
6.2	Enceinte de confinement	25
6.3	Cœur et cuve	26
6.4	Pilotage	26
6.5	Evolution des modèles	27

III	Physique des réacteurs	32
7	Neutronique	32
7.1	Interactions avec la matière	32
7.2	Réactivité et criticité	32
7.3	Contrôle de la réactivité	33
8	Thermique du combustible	33
8.1	Equation de conduction thermique	33
8.2	Pastille	34
8.3	Gap	34
8.4	Conduction dans la gaine	35
8.5	Synthèse	35
9	Thermohydraulique cœur	38
9.1	Evacuation de la puissance	38
9.2	Flux critique	39
10	Générateur de Vapeur	41
10.1	Principe de fonctionnement	41
10.2	Estimation de l'échange thermique	41
10.3	Taux de recirculation	42
10.4	Modes d'usure	42
A	Ressources documentaires	47

Première partie

Introduction générale au nucléaire

1 Réponse aux besoins énergétiques

1.1 Evolution de la demande

La demande mondiale en énergie est en constante progression, en lien avec l'augmentation de la population et du PIB par habitant.

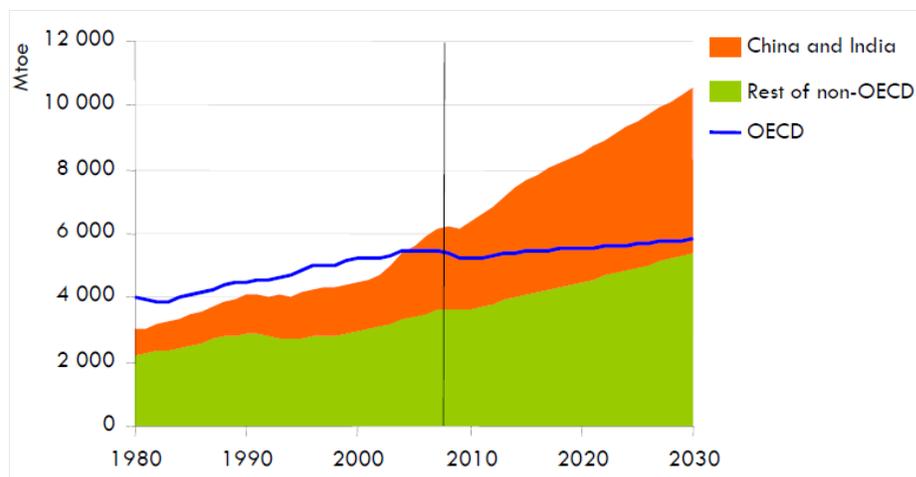


FIGURE 1 – Evolution de la consommation mondiale en énergie primaire par région [9]

1.2 Pré-dominance des énergies fossiles

Les énergies fossiles assurent la grosse majorité de la production en énergie primaire :

charbon première ressource actuelle, plus forte croissance prévue à court et moyen terme,

gaz croissance soutenue,

pétrole évolution contrastée en fonction des pays, utilisation davantage centrée sur les transports,

autres renouvelables et nucléaire permettent de réduire les émissions de CO₂ et de garantir les coûts de production.

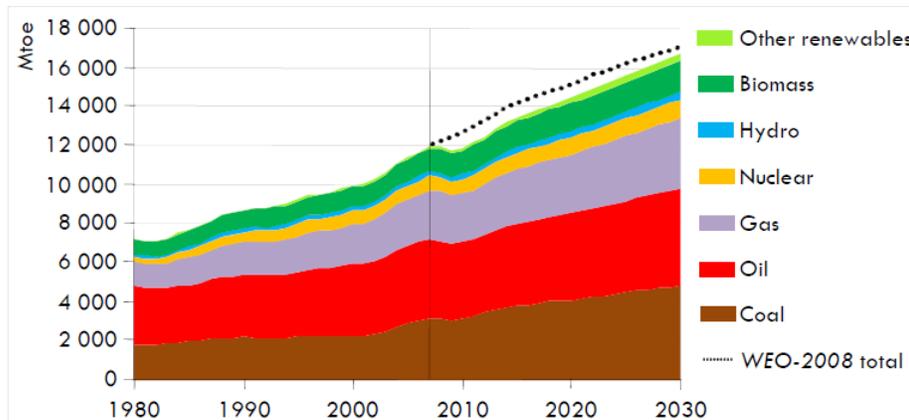


FIGURE 2 – Evolution de la consommation mondiale en énergie primaire par ressource [9]

1.3 Contribution de l'énergie nucléaire

Actuellement la part de *l'électricité* dans la consommation énergétique mondiale est contrastée en fonction des pays. La moyenne mondiale va progresser : 17% en 2008, 19% en 2015 et 22% en 2030 [10]. Cette progression s'explique par :

- l'accès croissant à l'électricité en Amérique latine et en Asie,
- le remplacement progressif des énergies *carbonées*.¹

Mis à part le pétrole, tous les moyens de production d'électricité sont en croissance. Les énergies renouvelables et le nucléaire vont contribuer à la moitié des nouveaux moyens de production électriques² qui seront installés dans le monde jusqu'en 2035.

1.4 Coûts de production

L'énergie nucléaire présentent plusieurs intérêts majeurs dans le contexte économique actuel (tensions sur les matières premières, incertitudes sur le coût du CO₂...) :

stabilité la ressource naturelle (Uranium) ne représente que quelques % des coûts de production,

géopolitique les ressources naturelles en Uranium sont bien réparties,

compétitivité vis-à-vis des autres moyens de production électrique (gaz en particulier).

A titre de comparaison, le prix de l'électricité :

1. En décembre 2008, l'Union Européenne a signé l'engagement des *trois 20* en 2020 : 20% d'énergies renouvelables, 20% de GES en moins, 20% d'efficacité énergétique en plus (et 10% de biocarburants).

2. Il faut tenir compte du taux de disponibilité des moyens (différence entre puissance et énergie).

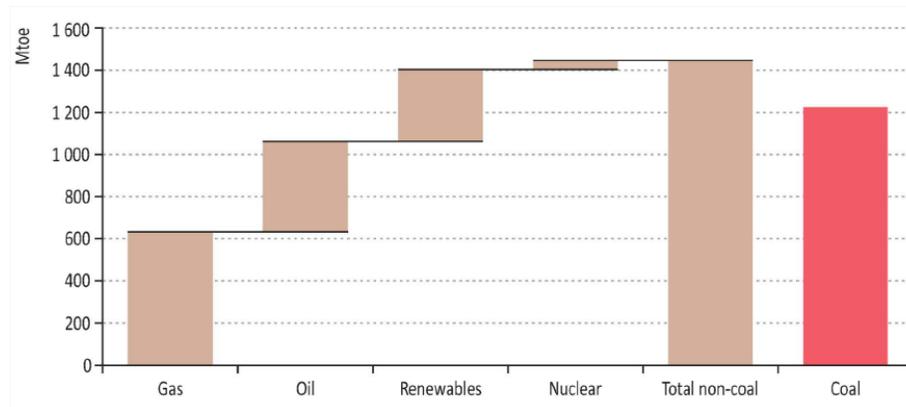


FIGURE 3 – Répartition de l'augmentation de la consommation mondiale en énergie primaire sur la période 2000-2010 [9]

nucléaire augmente de 5% maximum si le cours de l'Uranium double,
gaz augmente de 75% si le cours du gaz double.

2 Physique nucléaire et réaction en chaîne

2.1 Noyau atomique

Le noyau est constitué de A (nombre de masses) nucléons :

protons charge $+e$, en quantité Z (nombre de charges),

neutrons neutre, en quantité $A - Z$.

L'élément (table de Mendeleïev) et ses propriétés physiques et chimiques sont définis par Z . Les *isotopes* diffèrent par le nombre de neutrons (donc par A) qui influe sur les propriétés nucléaires. La cohésion nucléaire est assurée par l'interaction entre les nucléons : l'*énergie de liaison* est équivalente au *défaut de masse*.

$$E = \Delta m c^2 \quad (1)$$

$$\Delta m = Zm_p + (A - Z)m_n - M(A, Z) \quad (2)$$

L'énergie de liaison par nucléon (E/A) présente un maximum vers $A = 60$ (Fe, Ni, Zn).

2.2 Fusion nucléaire



$$E \approx 4 \times 7 - 2 \times 1 - 3 \times 3 \approx 17 \text{ MeV} \quad (4)$$

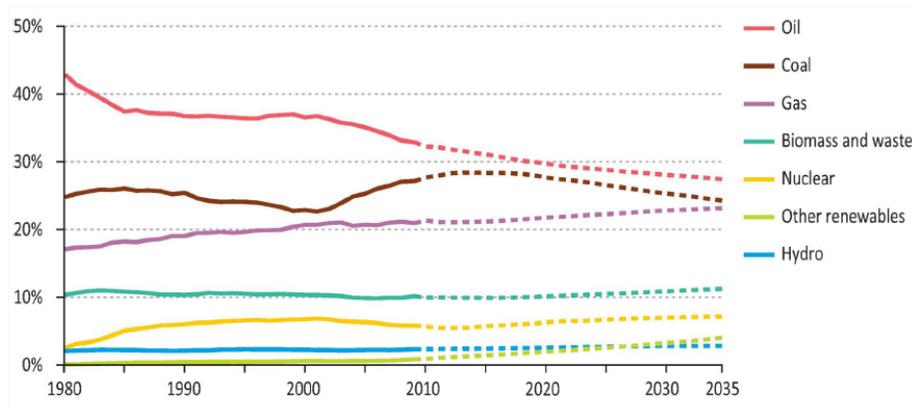


FIGURE 4 – Evolution de la production mondiale en énergie primaire par ressource [9]

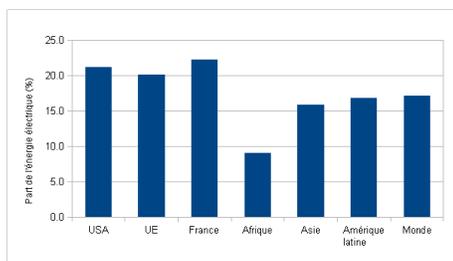
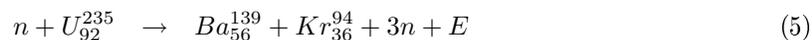


FIGURE 5 – Part de l'électricité dans la consommation d'énergie

NB : l'énergie libérée par les réactions chimiques (exothermiques) sont de l'ordre de l'électron-Volt.

2.3 Fission nucléaire



$$E \approx 139 \times 8.3 + 94 \times 8.8 - 235 \times 7.6 \approx 195 \text{ MeV} \quad (6)$$

L'énergie cinétique des neutrons libérés est de l'ordre de 2 MeV.

2.4 Réaction en chaîne

Les principaux isotopes fissiles sont caractérisés par :

émission le nombre moyen de neutrons ν libérés par la réaction de fission,

probabilité la section efficace σ de la réaction (exprimée en $\text{barn} = 10^{-24} \text{ cm}^2$).

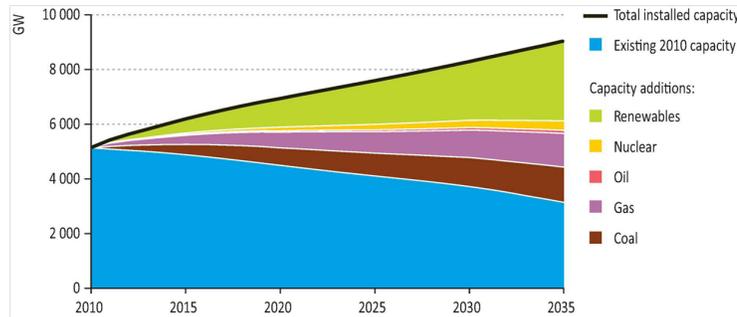


FIGURE 6 – Renouvellement de la puissance électrique installée mondiale [9]

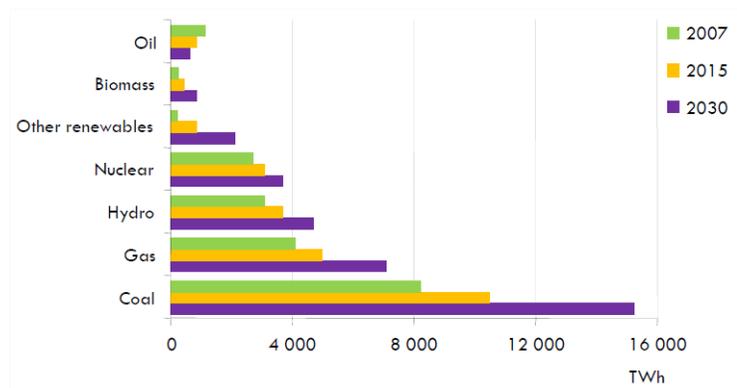


FIGURE 7 – Répartition de la production électrique mondiale [9]

Malheureusement la réaction de fission est en compétition avec des absorptions (ou captures) *stériles*. La *réaction en chaîne* peut s’entretenir si le bilan production-absorption est positif.

Remarques pour l’Uranium :

- l’isotope 238 est *fertile* : $U^{238} + n \rightarrow \dots \rightarrow Pu^{239}$
- l’isotope 235 est très rare dans l’Uranium naturel : 0.7% (et 99.3% U_{238}), soit 1/138.

Isotope	Fission		Capture
	ν	σ (barn)	σ (barn)
U^{233}	2.5	525	46
U^{235}	2.4	584	99
U^{238}			2.7
Pu^{239}	2.9	747	270

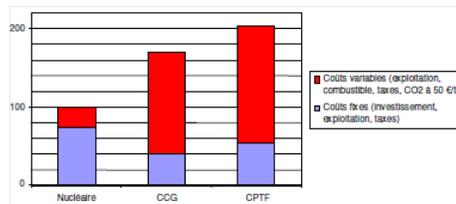


FIGURE 8 – Projection des coûts de production d'électricité en France en 2020 (Cycle Combiné au Gaz, Charbon Pulvérisé avec Traitement des Fumées) [8]

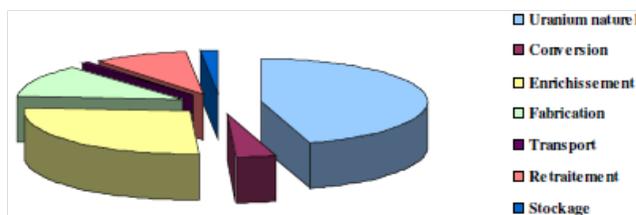


FIGURE 9 – Décomposition des coûts du combustible nucléaire en France [8]

2.5 Ralentissement

Les neutrons *rapides* ($E \approx 2 \text{ MeV}$) émis par les réactions de fission doivent être ralentis en neutrons *thermiques* ($E \approx 0.01 \text{ eV}$) pour initier de nouvelles réactions de fission. Le ralentissement se fait par une succession de chocs élastiques sur les noyaux atomiques. Le transfert d'énergie est maximum avec les noyaux légers : Hydrogène, Deutérium, Carbone. La diffusion est malheureusement en concurrence avec les réactions d'absorption (résonances). Un bon *modérateur* doit donc ralentir vite (peu de chocs) et consommer peu de neutrons.

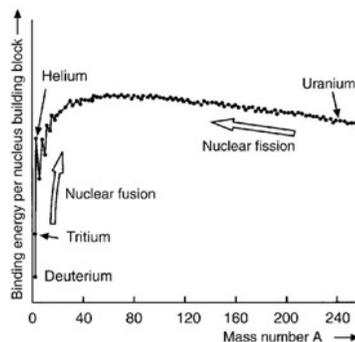


FIGURE 10 – Energie de liaison par nucléon en fonction du nombre de masses

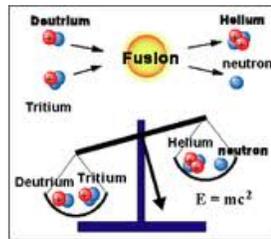


FIGURE 11 – Réaction de fusion Deuterium-Tritium

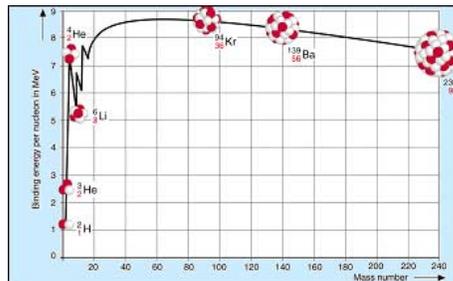


FIGURE 12 – Réaction de fission de l'Uranium

Noyau	Absorption thermique σ_a relative	Nombre de chocs n
H	1	15
D	$1.5 \cdot 10^{-3}$	20
C	10^{-2}	92
O	$8.5 \cdot 10^{-4}$	121

2.6 Radio-activité

Les noyaux *instables* contiennent trop d'énergie ou de nucléons. Ils peuvent alors se désintégrer pour atteindre un état plus stable. Cette libération de masse et /ou

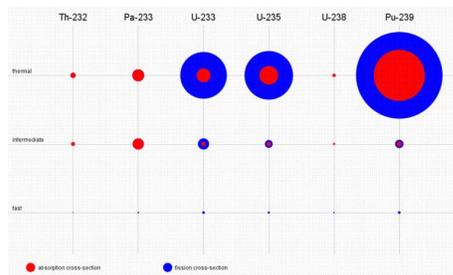


FIGURE 13 – Sections efficaces relatives des isotopes fissiles ou fertiles

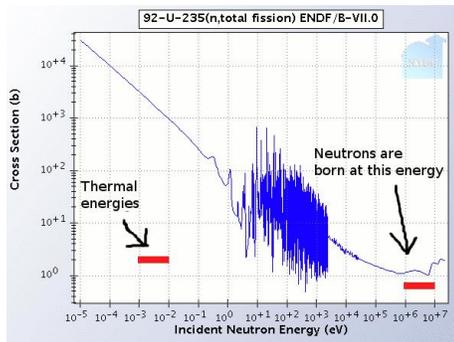


FIGURE 14 – Section efficace de fission de l'Uranium 235 en fonction de l'énergie du neutron incident

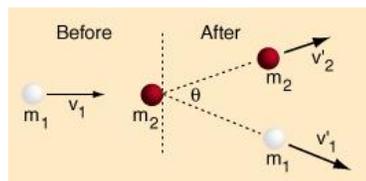


FIGURE 15 – Diffusion élastique sur une particule immobile

d'énergie s'accompagne de rayonnements :

alpha émission d'un noyau d'Helium (He_2^4),

beta transformation d'un neutron en proton avec émission d'un électron (β^-),
ou transformation d'un proton en neutron avec émission d'un positron (β^+),

gamma émission d'une onde électro-magnétique de haute énergie.

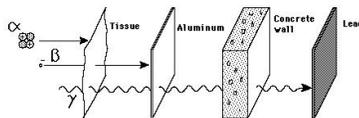


FIGURE 16 – Interaction rayonnement-matière

Les principales conséquences de la radio-activité dans les réacteurs nucléaires sont :

radio-protection (et confinement) pour se protéger des effets néfastes sur l'environnement et sur l'homme,

puissance résiduelle le combustible nucléaire irradié dégage une puissance thermique importante, même en dehors du réacteur.

3 Principales options de conception

3.1 Cœur

La conception d'un réacteur nucléaire commence par la neutronique et la définition des options principales du cœur :

combustible Uranium naturel/enrichi, Plutonium,

modérateur (si nécessaire) eau légère/lourde, graphite,

réfrigérant eau, métal liquide, gaz,

contrôle réactivité barres/croix de contrôle, poisons consommables, bore soluble.

Le choix des matériaux (gainage combustible, structures) est ensuite choisi en fonction de la compatibilité avec les fluides (physico-chimie), l'irradiation (fluence) et les conditions de fonctionnement (température, pression).

3.2 Réfrigérant

La seconde étape concerne le(s) système(s) de refroidissement :

cycle direct (e.g. REB) même circuit pour le cœur (source chaude), la turbine (production électrique) et le condenseur (source froide),

cycle indirect (e.g. REP, RNR) circuits différents pour refroidir le cœur (îlot nucléaire) et pour produire l'électricité (partie conventionnelle), barrière physique pour le confinement des matières radioactives.

Deuxième partie

Réacteurs (passé, présent, avenir)

4 Histoire et filières de réacteurs

4.1 Découvertes fondamentales

Les principales étapes qui ont ouvert la voie au développement de l'industrie nucléaire sont :

- 1932** découverte du *neutron* par J. Chadwick (prix Nobel de Physique en 1935) qui a répété les expériences du couple Joliot-Curie (prix Nobel de Chimie en 1935).
- 1934-38** plusieurs équipes (E. Fermi, O. Hahn, Joliot-Curie) travaillent en parallèle sur les réactions nucléaires.
- 1938** la réaction de *fission* est mise en évidence par O. Hahn, F. Strassmann, et L. Meitner qui identifient les *produits de fission*.
- 1942** la *réaction en chaîne* est démontrée par E. Fermi et son équipe à Chicago. La *pile* est constituée d'Uranium naturel (50 t) et de graphite (385 t) (et de barres en Cadmium).
- 1945** la séparation et la purification des isotopes fissiles permet aux USA de réaliser deux essais nucléaires : *Little Boy* (Uranium) à Hiroshima et *Fat Man* (Plutonium) à Nagasaki.
- 1948** divergence de la pile Zoé (Uranium et eau lourde) sous la direction de F. Joliot (CEA, Fontenay aux Roses).

4.2 Projets pionniers

Les premiers réacteurs nucléaires furent développés pour la production militaire de Plutonium. Ensuite des réacteurs furent développés pour la propulsion navale et la production d'électricité :

- 1953** discours *Atoms for peace* du président Eisenhower aux Nations Unies : *serve the needs rather than the fears of humanity*.
- 1954** lancement du *Nautilus*, premier sous-marin à propulsion nucléaire (USA).
- 1954** première connexion au réseau électrique d'un réacteur nucléaire : Obninsk, URSS, 5 MW.
- 1956** premier réacteur commercial (et plutonigène) : Calder Hall, Grande Bretagne, 60 MW.
- 1956** mise en service du premier réacteur UNGG : Marcoule, 2 MW.
- 1957** premier réacteur commercial à eau légère (exclusivement électrogène) : Shippingport, USA, 60 MW.

La *première génération* des réacteurs nucléaires est ainsi constituée par des réacteurs utilisant de l'Uranium naturel et dont la puissance reste limitée (200 MW).

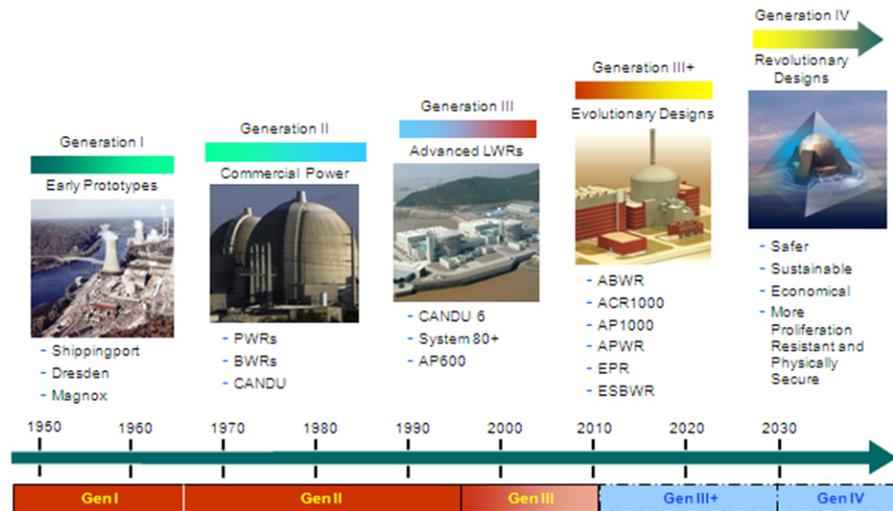


FIGURE 17 – Générations de réacteurs nucléaires

4.3 Parc actuel

La *seconde génération* s'est développée essentiellement pendant la période 1970-90 :

crises pétrolières réduction de la dépendance énergétique, stabilisation des prix de l'énergie,

enrichissement procédés industriels disponibles à grande échelle,

REL parc majoritairement constitué des Réacteurs à Eau sous Pression et des Réacteur à Eau Bouillante.

Monde entier

France

4.4 Générations futures

Génération III

Les objectifs de la troisième génération de réacteurs nucléaires sont :

sûreté prise en compte des *accidents graves* à la conception (*Beyond Design Basis Accidents* de la génération II). L'accident récent de Fukushima incite à prévenir davantage les situations extrêmes avec fusion du cœur.

économie meilleure utilisation du combustible nucléaire, durée de vie accrue (60 ans à la conception), simplification de certains systèmes, meilleure disponibilité (allongement des cycles, réduction des périodes d'arrêt), flexibilité d'exploitation.

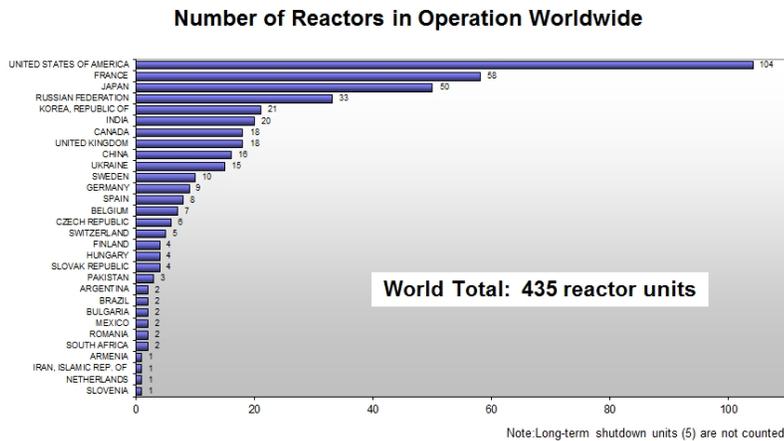


FIGURE 18 – Répartition du parc nucléaire par pays (AIEA, 2011)

Les principaux compétiteurs résultent des évolutions de la technologie des réacteurs de la Génération II :

PWR EPR (Areva), AP-1000 (Westinghouse-Toshiba), APR-1400 (KHNP),

BWR ABWR (Hitachi-GE), ESBWR (GE), Kerena (Areva).

Les évolutions de l'*EPR* en matière de sûreté sont :

redondance quatre trains de systèmes de sauvegarde sont prévus, dans quatre bâtiments indépendants.

confinement enceinte de confinement renforcée (agressions internes et externes), avec deux parois en béton et une peau métallique.

corium récupérateur du cœur fondu en cas d'accident grave.

sismique hauteur réduite des bâtiments, socle anti-sismique renforcé.

Génération IV

Le Forum International Génération IV a été créé en 2000 afin de fédérer les efforts internationaux pour le développement de réacteurs innovants. Les objectifs visés pour ces réacteurs de nouvelle technologie sont :

développement durable pas d'émission de CO₂, durabilité des ressources combustibles, réduction des déchets radio-actifs, rendement amélioré (utilisation directe de la chaleur),

économie coût de production inférieur aux autres sources d'énergie, risque financier équivalent,

sûreté niveau de sûreté renforcé (agressions externes et internes),

prolifération utilisation pacifique (pas de détournement militaire).

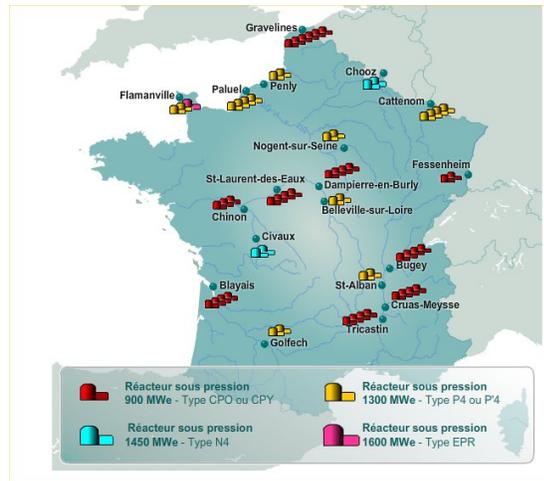


FIGURE 19 – Répartition géographique des centrales nucléaires en France

Six concepts de réacteur sont à l'étude :

GFR (Gas-Cooled Fast Reactor) neutrons rapides, caloporteur helium,

VHTR (Very-High-Temperature Reactor) modération graphite, caloporteur helium,

SCWR (Supercritical-Water-Cooled Reactor) eau à haute pression et température,

SFR (Sodium-Cooled Fast Reactor) neutrons rapides, caloporteur sodium,

LFR (Lead-Cooled Fast Reactor) neutrons rapides, caloporteur plomb ou plomb-bismuth,

MSR (Molten Salt Reactor) combustible liquide (solution à base de fluorides).

4.5 Panorama des filières

La classification des réacteurs doit considérer plusieurs critères :

neutronique spectre rapide ou thermique,

cycle conversion d'énergie directe (un seul circuit fluide) ou indirecte (plusieurs circuits),

modérateur (si nécessaire) eau lourde, eau légère, carbone,

caloporteur eau, métal liquide, gaz,

combustible composition, forme (crayons, plaques, sphères...).

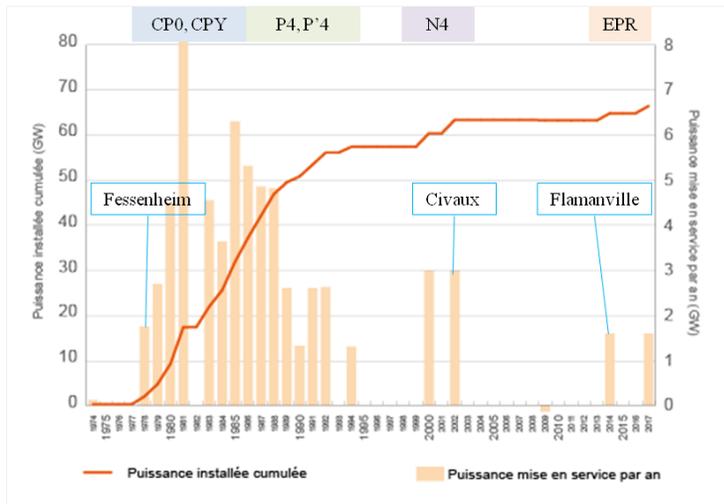


FIGURE 20 – Construction et mise en service du parc français

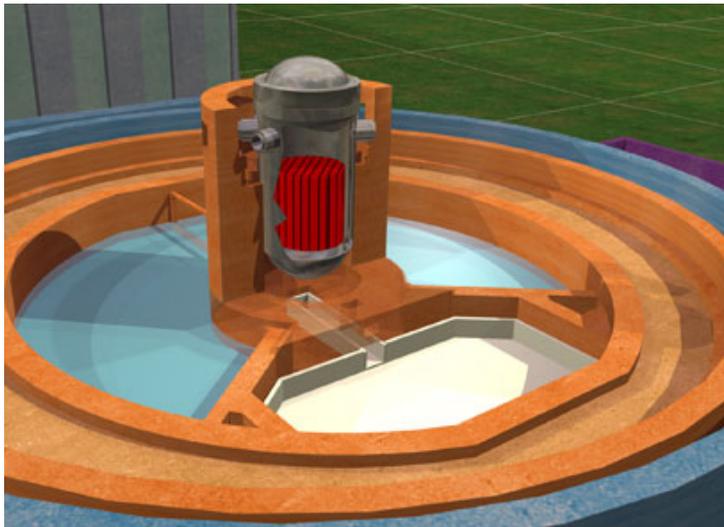


FIGURE 21 – Récupérateur de corium de l'EPR

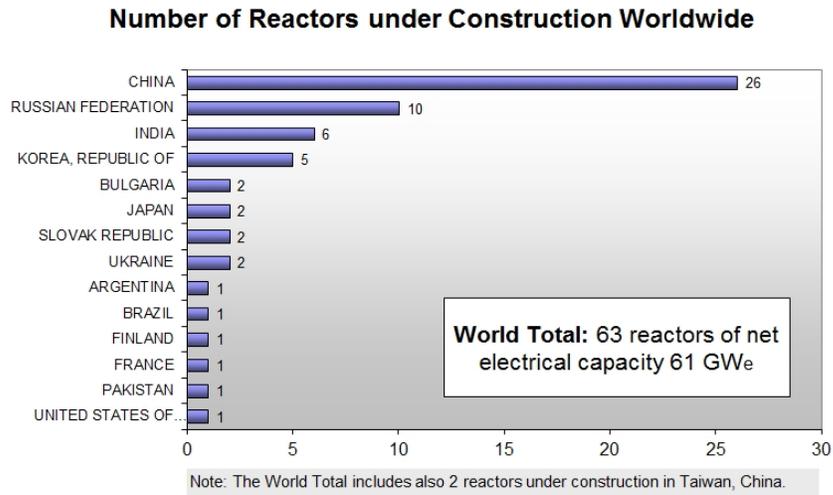


FIGURE 22 – Réacteurs nucléaires en construction (AIEA, 2011)



FIGURE 23 – Les 13 membres du GIF

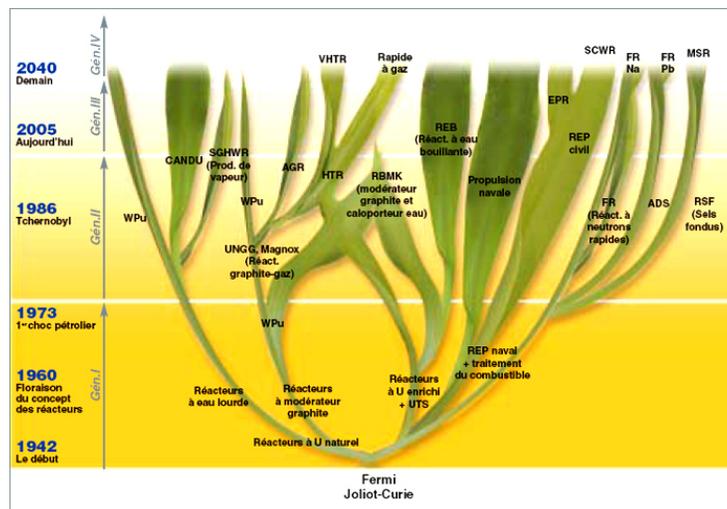


FIGURE 24 – Classification des réacteurs nucléaires

5 Réacteur à Eau sous Pression

5.1 Description d'ensemble

Le Réacteur à Eau sous Pression (REP) est caractérisé par :

cycle indirect deux circuits séparés pour réfrigérer le cœur et pour alimenter les turbines,

primaire haute pression (15.5 MPa), monophasique liquide,

secondaire moyenne pression (7-8 MPa), diphasique liquide-vapeur,

GV échangeur thermique entre les deux circuits (3 ou 4 GV par réacteur),

tertiaire basse pression et température, circuit ouvert sur la source froide,

barrières trois barrières de confinement de la radio-activité (gaine du combustible, circuit primaire, enceinte).

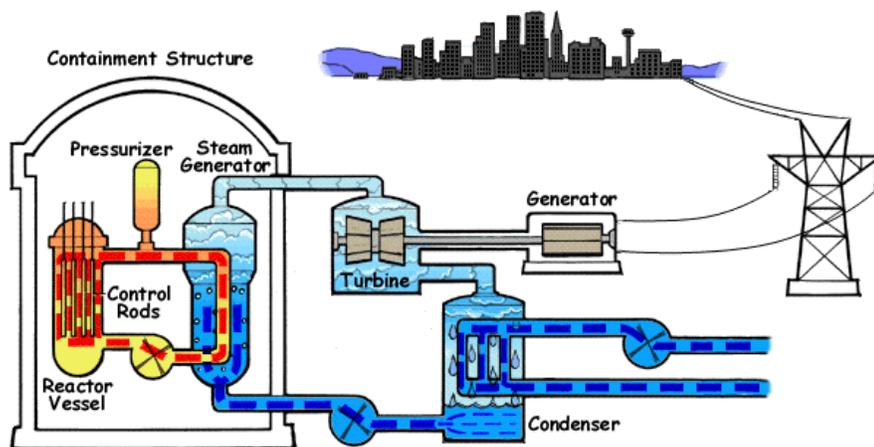


FIGURE 25 – Schéma de principe global d'un REP

5.2 Cœur

Les principales caractéristiques du cœur sont :

assemblages section carrée, hauteur voisine de 4 m, $150 < nombre < 200$,

réactivité contrôle assuré par du bore soluble et des barres de contrôle,

rechargement partiel (1/3, 1/4), période de 12 à 18 mois. ce qui conduit à des disparités de puissance entre les assemblages (en fonction de leur taux d'irradiation).

5.3 Conversion d'énergie

La conversion de l'énergie nucléaire, déposée sous forme thermique dans le combustible, en énergie électrique est basée sur le cycle de Rankine (machine à vapeur) :

Générateur de Vapeur échangeur thermique primaire-secondaire qui vaporise l'eau du circuit secondaire,

Turbine détente de la vapeur qui entraîne l'arbre turbine-alternateur,

Condenseur condensation de la vapeur avant son pompage vers les GV.

Le rendement de conversion idéal est celui du cycle de Carnot (sources chaudes et froides à température constante, transformations réversibles) :

$$\eta = \frac{W_{net}}{Q_{fourni}} = 1 - \frac{T_{froid}}{T_{chaud}} \quad (7)$$

Le rendement *brut* du cycle de Rankine dépend directement du rendement de la turbine (caractérise l'irréversibilité de la détente vapeur) :

$$\eta = \frac{W_{net}}{Q_{fourni}} = \frac{W_{turbine} - W_{pompe}}{Q_{GV}} \approx \frac{W_{turbine}}{Q_{GV}} \approx \frac{1}{3} \quad (8)$$

5.4 Conditions de fonctionnement

Les conditions de fonctionnement nominales sont définies pour satisfaire les objectifs de :

performances rendement, utilisation du combustible, durée de vie . . .

sûreté marges par rapport aux phénomènes limitants, conditions incidentelles et accidentelles.

La température de la source froide étant fixée naturellement, le concepteur ne peut jouer que sur les conditions de fonctionnement de la chaudière nucléaire (température de la source chaude). Avec l'eau, une température de fonctionnement élevée nécessite également une pression élevée (contrairement aux métaux liquides et aux gaz), ce qui implique des chargements importants sur les structures (tuyauteries, cuves . . .). Les conditions nominales du REP 1300 (4 boucles) sont :

Circuit primaire		
Pression	15.5	<i>MPa</i>
Temp. saturation	345	<i>°C</i>
Temp. entrée cœur	293	<i>°C</i>
Temp. sortie cœur	328	<i>°C</i>
Débit	18.8	<i>t/s</i>
Puissance thermique	3817	<i>MW</i>

Circuit secondaire		
Pression vapeur	7.3	<i>MPa</i>
Temp. entrée GV	229	<i>°C</i>
Temp. sortie GV	286	<i>°C</i>
Temp. condenseur	30	<i>°C</i>
Débit	2.14	<i>t/s</i>

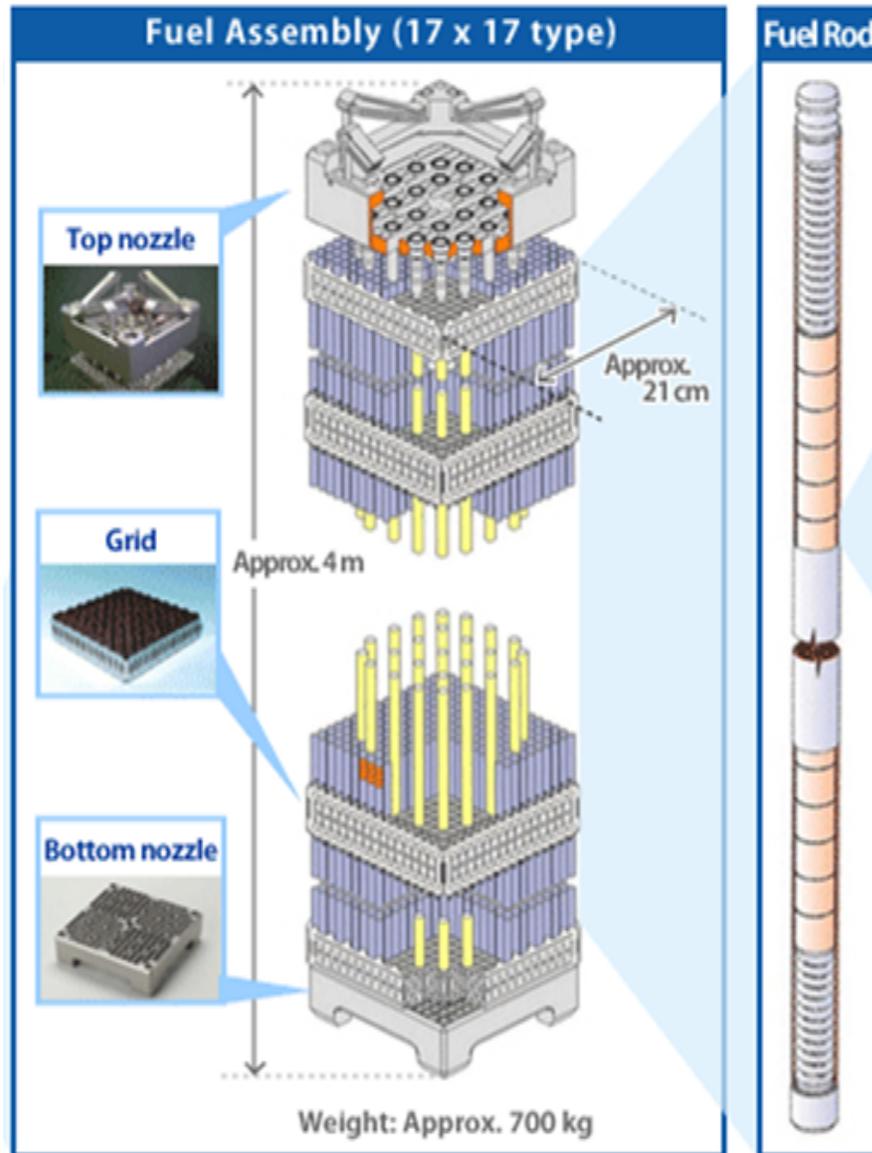


FIGURE 26 – Vue simplifiée d'un assemblage combustible

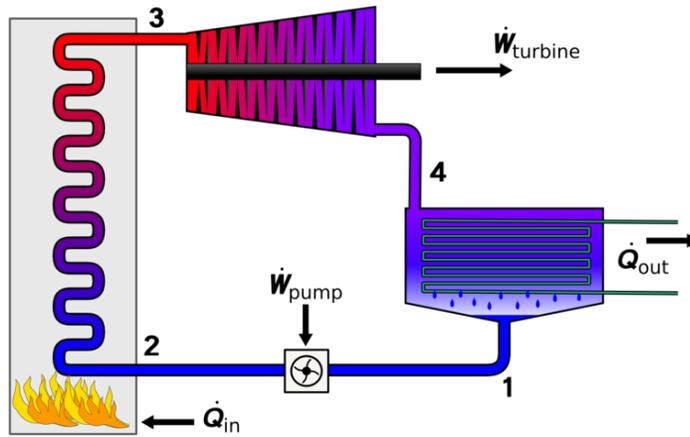


FIGURE 27 – Principe du cycle de Rankine

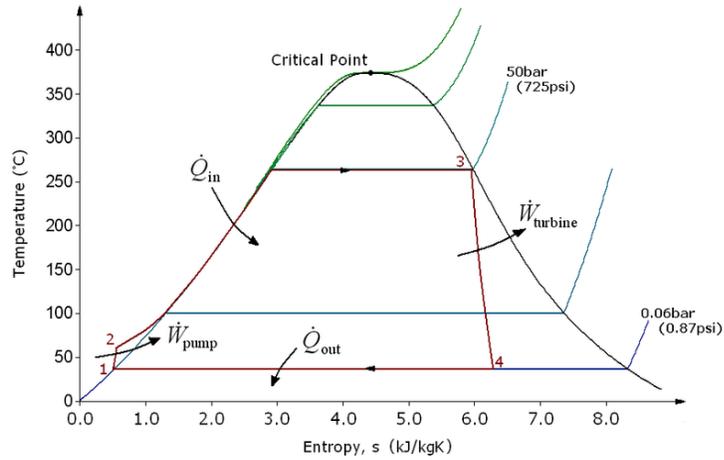


FIGURE 28 – Diagramme température-entropie du cycle de Rankine

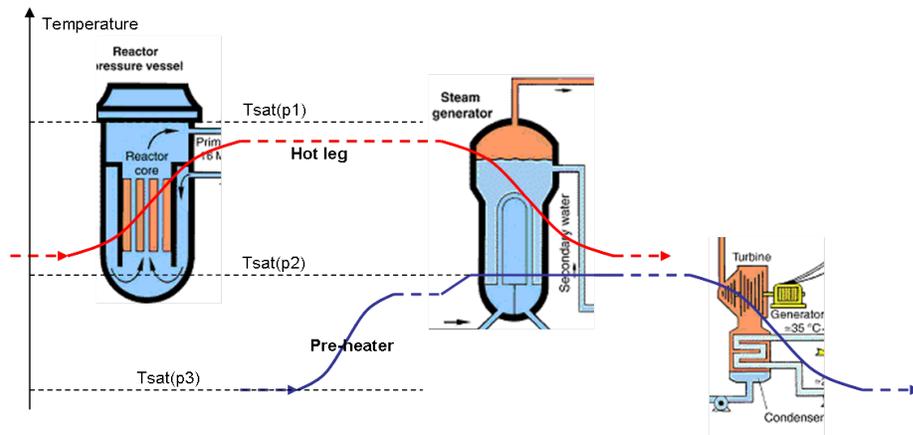


FIGURE 29 – Variation de température dans les circuits REP

6 Réacteur à Eau Bouillante

6.1 Vue d'ensemble

Le Réacteur à Eau Bouillante (REB) est caractérisé par :

cycle direct un seul circuit pour réfrigérer le cœur et pour alimenter les turbines,

caloporteur moyenne pression (7-8 MPa) assurée par la turbine (pas de pressuriseur), diphasique liquide-vapeur,

pilotage couplé puissance-débit, ce qui permet facilement le suivi de charge,

barrières la seconde barrière de confinement est dynamique (vannes admission turbine).

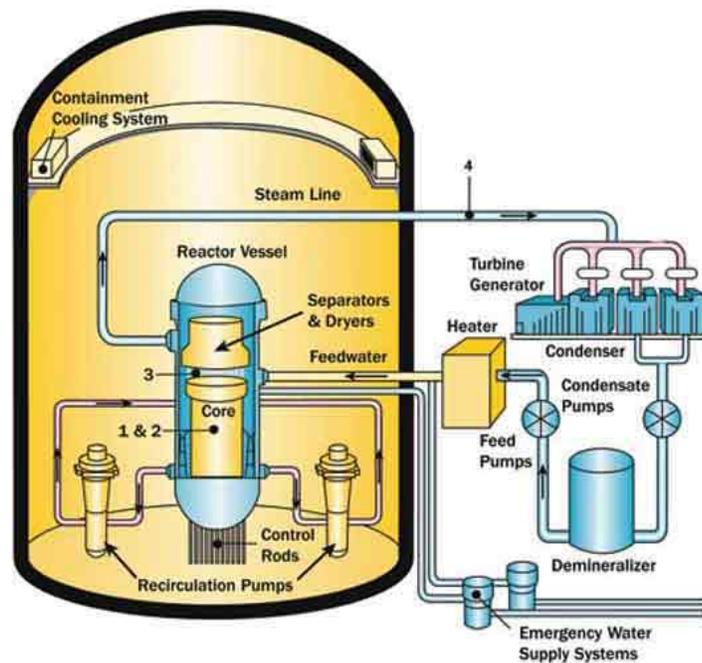


FIGURE 30 – Schéma de principe global d'un REB

6.2 Enceinte de confinement

La troisième barrière d'un REB est conçue en deux parties :

dry well enceinte sèche rapprochée,

wet well enceinte humide qui permet de réguler la pression par condensation de la vapeur.

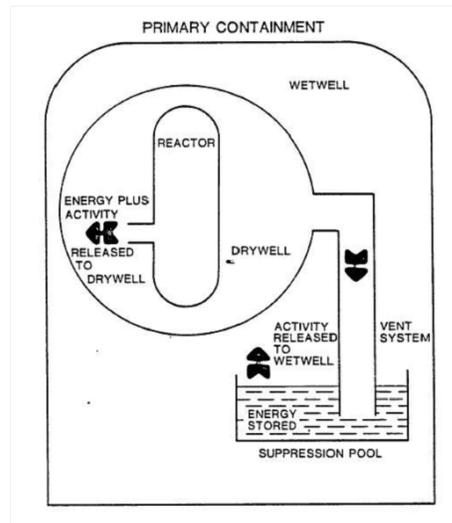


FIGURE 31 – Principe de fonctionnement d'une enceinte REB

6.3 Cœur et cuve

La cuve du réacteur est plus volumineuse que pour le REP (radial et axial) car elle abrite deux fonctions :

nucléaire assemblages combustibles,

vapeur production, séparation et séchage (cf. GV de REP).

Les principales caractéristiques du cœur sont :

assemblages section carrée, réseau 7x7 à 10x10, boîtiers fermés,

réactivité contrôle assuré par des poisons consommables dans les crayons et des croix de contrôle qui s'insèrent par le bas entre les assemblages,

couplage TH-N forte variation axiale de la densité du modérateur,

recirculation de l'eau non vaporisée (environ 85%).

6.4 Pilotage

Contrairement au REP, la turbine est asservie au réacteur à cause du couplage pression-réactivité. Par exemple pour augmenter la puissance électrique :

- la vitesse des pompes de recirculation est augmentée par ouverture des vannes de régulation du débit,
- et/ou les absorbants sont extraits,

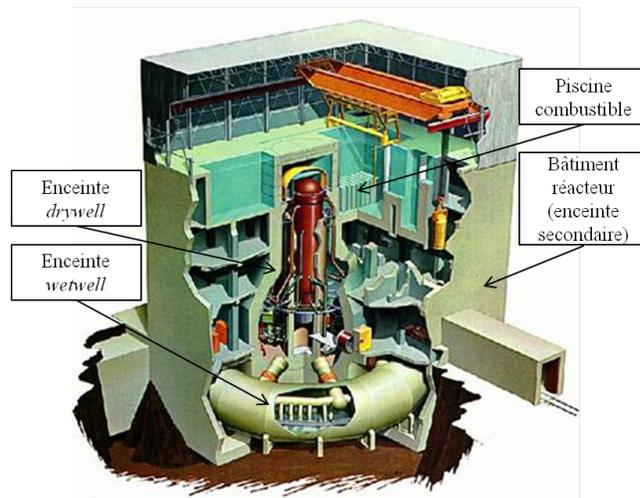


FIGURE 32 – Coupe du bâtiment réacteur pour une enceinte de type Mark I

- la réactivité augmente (contre-réactions),
- la pression de vapeur augmente,
- le débit vapeur peut être augmenté par ouverture des vannes d'admission turbine.

Du point de vue radial dans le cœur, il faut également tenir compte du couplage puissance-débit. Ainsi un zonage hydraulique est nécessaire pour maintenir la répartition du débit entre les assemblages et éviter les instabilités (statiques et dynamiques).

6.5 Evolution des modèles

La recirculation par des boucles externes peut être remplacée par des pompes internes à la cuve. Ainsi les risques liés au brèches sont fortement réduits et l'irradiation est diminuée dans le bâtiment réacteur. Cette technologie est prouvée par des réacteurs en fonctionnement au Japon.

Pour simplifier encore la cuve, il est possible de supprimer totalement les pompes et utiliser uniquement la convection naturelle. Pour cela la hauteur de la cuve est augmentée pour intégrer une cheminée entre le cœur et les séparateurs.

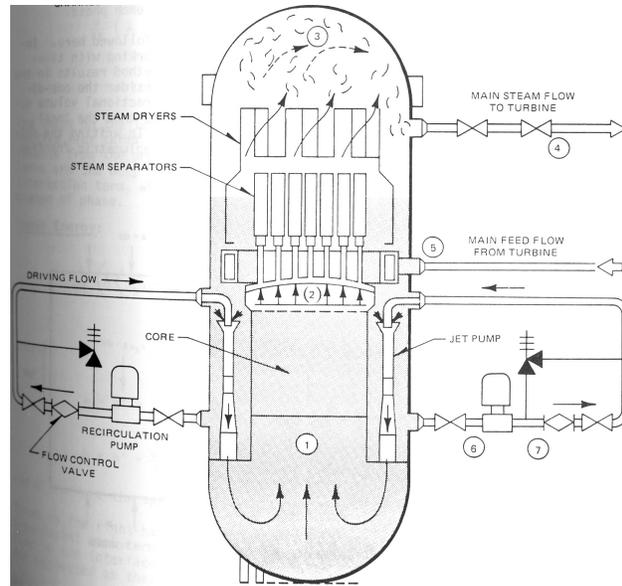


FIGURE 33 – Ecoulement du caloporteur dans la cuve REB

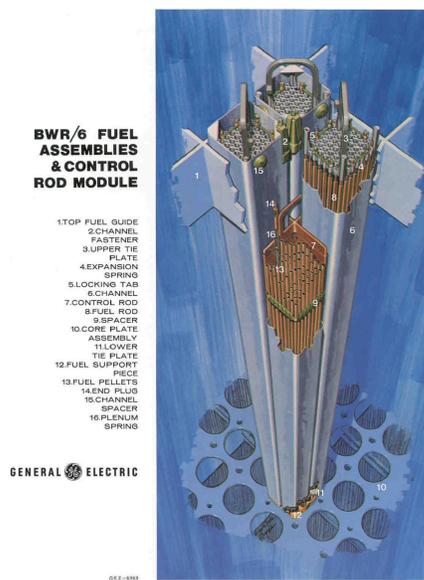


FIGURE 34 – Motif de quatre assemblages

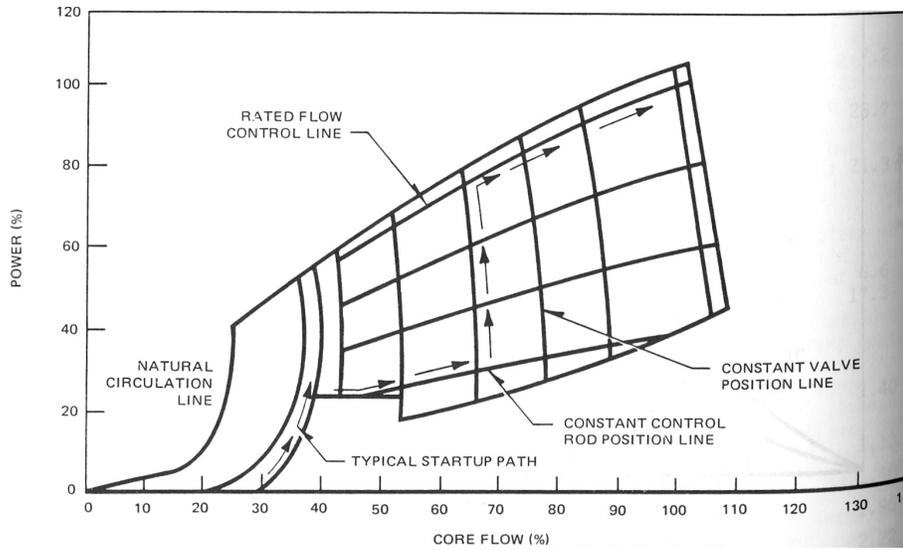


FIGURE 35 – Carte de fonctionnement puissance-débit

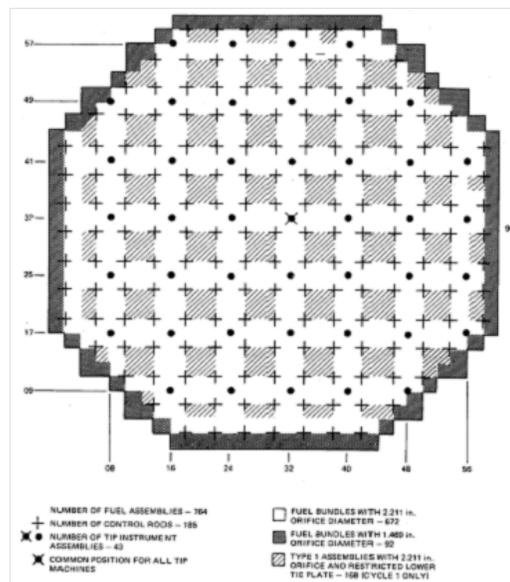


FIGURE 36 – Exemple de zonage radial (Peach Bottom)

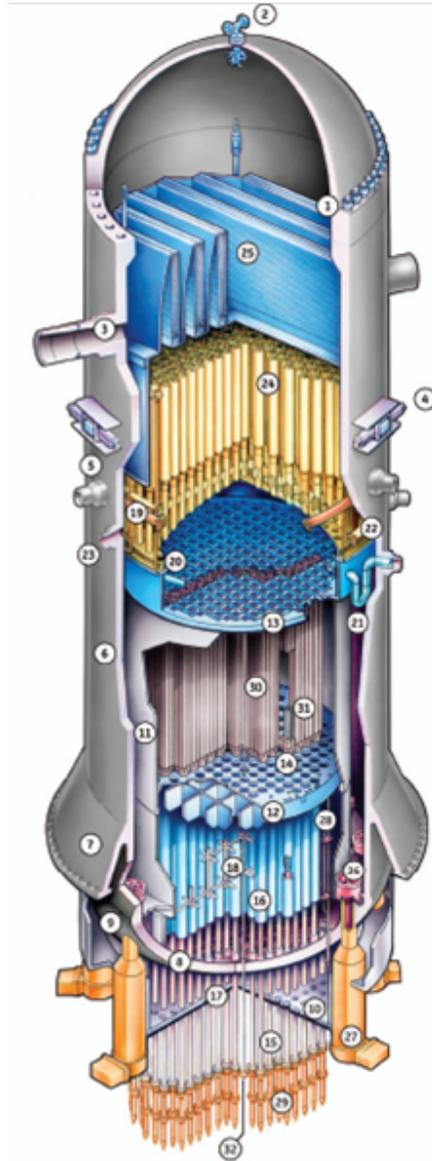


FIGURE 37 – Concept de cuve intégrée de l'ABWR

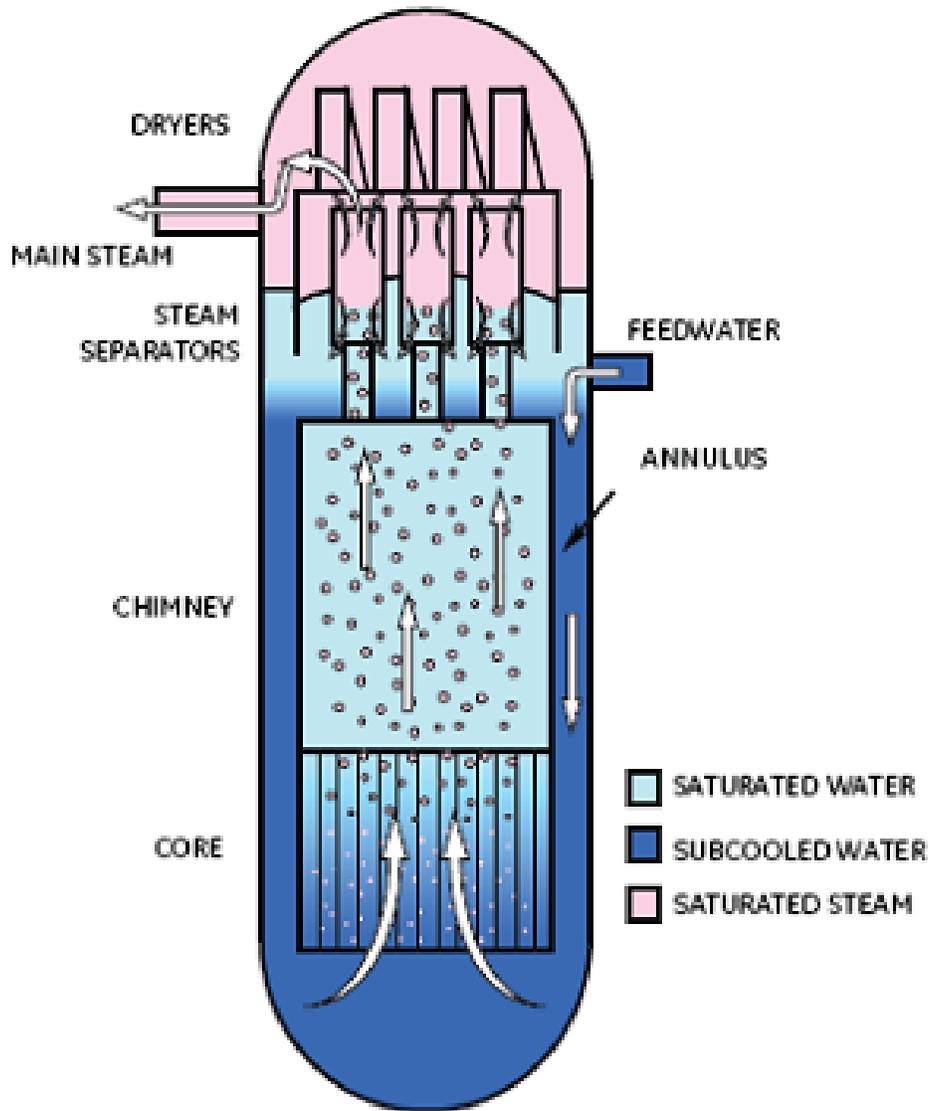


FIGURE 38 – Cuve à circulation naturelle de l'ESBWR

Troisième partie

Physique des réacteurs

7 Neutronique

7.1 Interactions avec la matière

La probabilité d'interaction d'un neutron avec la matière est définie à partir de la section efficace *macroscopique* :

$$P([x; x + dx]) = \Sigma dx \quad (9)$$

$$\Sigma = \sum_i N_i \sigma_i \quad (10)$$

où :

- N_i est la densité volumique des noyaux de type i ,
- σ_i est la section efficace *microscopique* d'interaction des noyaux de type i .

Dans un REP, les principaux noyaux/atomes présents sont H , O , U , Zr , B et produits de fission. Les principales (inte)réactions possibles dans un réacteur sont :

fission absorption par un noyau lourd fissile,

capture absorption par un noyau non fissile,

diffusion choc élastique avec transfert d'énergie (ralentissement).

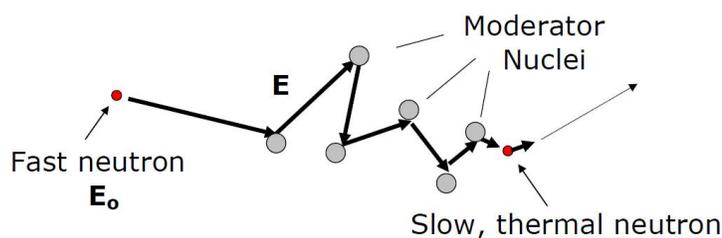


FIGURE 39 – Principe du ralentissement des neutrons

7.2 Réactivité et criticité

Le *facteur de multiplication* en milieu infini est défini par :

$$k_{\infty} = \frac{\text{production}}{\text{absorption}} = \frac{\nu \Sigma_f}{\Sigma_a} \quad (11)$$

Le facteur de multiplication *effectif* tient compte des fuites :

$$k_{eff} = \frac{\text{production}}{\text{absorption} + \text{fuites}} = \frac{k_{\infty}}{1 + M^2 B^2} \quad (12)$$

où $M^2 B^2$ dépend de la taille et de la forme du réacteur. Trois situations sont alors possibles pour le réacteur :

sous-critique $k_{eff} < 1$, la population neutronique diminue (réduction de puissance),

critique $k_{eff} = 1$, la population neutronique est stable (puissance constante),

sur-critique $k_{eff} > 1$, la population neutronique augmente (augmentation de puissance).

Les écarts à la criticité sont faibles et se mesurent par la réactivité (en pcm = 10^{-5}) :

$$\rho = \frac{k_{eff} - 1}{k_{eff}} \quad (13)$$

7.3 Contrôle de la réactivité

La réactivité est influencée par :

composition noyaux en présence dans le cœur

- noyaux fissiles (réduction progressive),
- produits de fission qui absorbent les neutrons (augmentation progressive),
- modérateur (densité variable),
- bore soluble et barres de contrôle,

température combustible effet Doppler sur les sections efficaces,

densité modérateur variation du rapport de modération.

8 Thermique du combustible

Objectif

Dissiper l'énergie nucléaire générée dans le combustible.

8.1 Equation de conduction thermique

Le problème de la conduction thermique dans un solide est défini par les deux équations suivantes :

$$\rho c_p \frac{\partial}{\partial t} T + \text{div } \vec{q}'' = q''' \quad (14)$$

$$\vec{q}'' = -\lambda \text{grad } T \quad (15)$$

Dans le cas particulier des crayons combustibles, on peut se ramener à la résolution d'un problème uni-dimensionnel :

symétrie de révolution la direction azimutale (θ) n'est pas nécessaire,

élongation axiale le gradient axial est négligeable ($\partial T / \partial z \ll \partial T / \partial r$).

Ainsi les équations 14 et 15 se combinent en l'équation de la chaleur 1D en coordonnées cylindriques :

$$\rho c_p \frac{\partial}{\partial t} T - \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right) = \underbrace{q'''}_{-q''} \quad (16)$$

En régime *stationnaire*, l'intégration de l'équation 16 donne :

$$q'' = \frac{1}{2} q''' r + \frac{C_1}{r} \quad (17)$$

$$\int_{T(0)}^{T(R)} \lambda dT = - \int_0^R \left(\frac{1}{2} q''' r + \frac{C_1}{r} \right) dr \quad (18)$$

Si la conductivité est indépendante de la température, alors on obtient finalement :

$$T(r) = -\frac{q'''}{4\lambda} r^2 - \frac{C_1}{\lambda} \ln(r) + C_2 \quad (19)$$

Les constantes d'intégration sont données par les conditions limites de température (Dirichlet) ou de flux (Neumann).

8.2 Pastille

Dans le cas des combustibles UO₂ et PuO₂, la conductivité thermique varie sensiblement avec la température. Ainsi on utilise directement l'équation 18 et l'intégrale de conductivité du matériau pour déterminer l'écart de température dans la pastille :

$$\int_{T(0)}^{T(R)} \lambda dT = -\frac{\langle q''' \rangle R^2}{4} = -\frac{q'}{4\pi} \quad (20)$$

Ainsi la différence de température entre le bord de le centre de la pastille combustible ne dépend que de la *puissance linéique* q' (W/m) dégagée dans le combustible (ne dépend pas du rayon extérieur pour une pastille pleine).

8.3 Gap

Le *gap*, espace séparant la pastille et la gaine, est rempli initialement d'hélium. Au cours de l'irradiation, d'autres gaz (produits de fission, mauvais conducteurs) viennent se mélanger. La gaine flue vers l'intérieur sous l'effet du différentiel de pression (diminue avec l'irradiation). La géométrie de la pastille évolue également avec la puissance (dilatation thermique) et l'irradiation (gonflement et fissuration). Au final, le gap a tendance à se refermer avec l'irradiation (contact établi après un cycle).

Face à cette complexité, l'échange thermique dans le gap est modélisé par une résistance thermique :

$$\Delta T_{gap} = R_{th,gap} q''(R) = \underbrace{R_{th,gap}}_{1/H_{gap}} \frac{q'}{2\pi R} \quad (21)$$

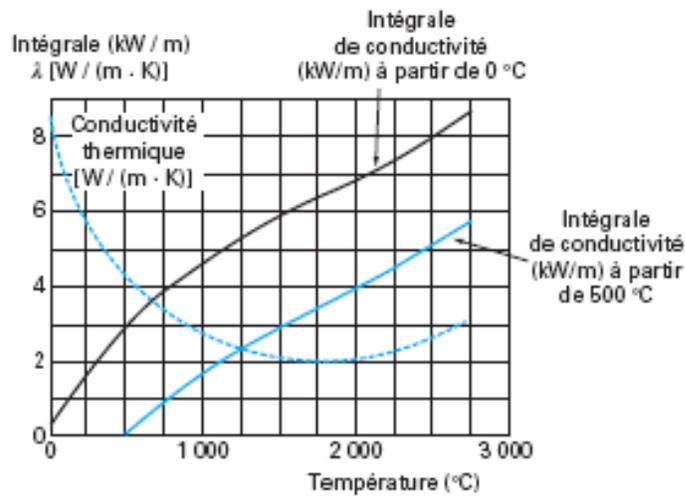


FIGURE 40 – Intégrale de conductivité pour l'UO2

où R est le rayon de la pastille.

La résistance thermique du gap est évaluée à partir de simulations numériques ou d'abaques qui prennent en compte l'historique de puissance et d'irradiation.

8.4 Conduction dans la gaine

La variation de température dans la gaine est faible car elle est fine et sa conductivité est bonne par rapport à l'échange thermique par convection avec le fluide. On peut ainsi estimer la différence de température à partir de l'équation 19 par :

$$T(R_i) - T(R_e) = \frac{q'}{2\pi\lambda} \ln\left(\frac{R_e}{R_i}\right) \quad (22)$$

ou encore en faisant apparaître l'épaisseur $e = R_e - R_i$:

$$T(R_i) - T(R_e) \approx \underbrace{\frac{q'}{2\pi R_i}}_{q''} \underbrace{\frac{e}{\lambda}}_{R_{th,gaine}} \quad (23)$$

8.5 Synthèse

Le profil radial de température dans le crayon comporte trois parties :

pastille forte élévation de température (forte densité de puissance et faible conductivité),

gap discontinuité très variable en fonction des conditions ($\approx 100^\circ C$),

gaine très faible gradient de température ($\approx 10^\circ C$).

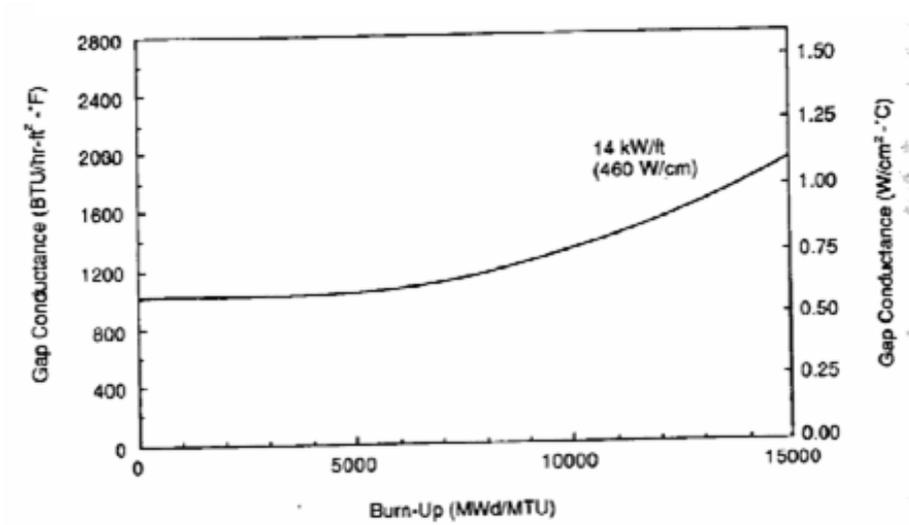


FIGURE 41 – Evolution du H_{gap} avec l'irradiation

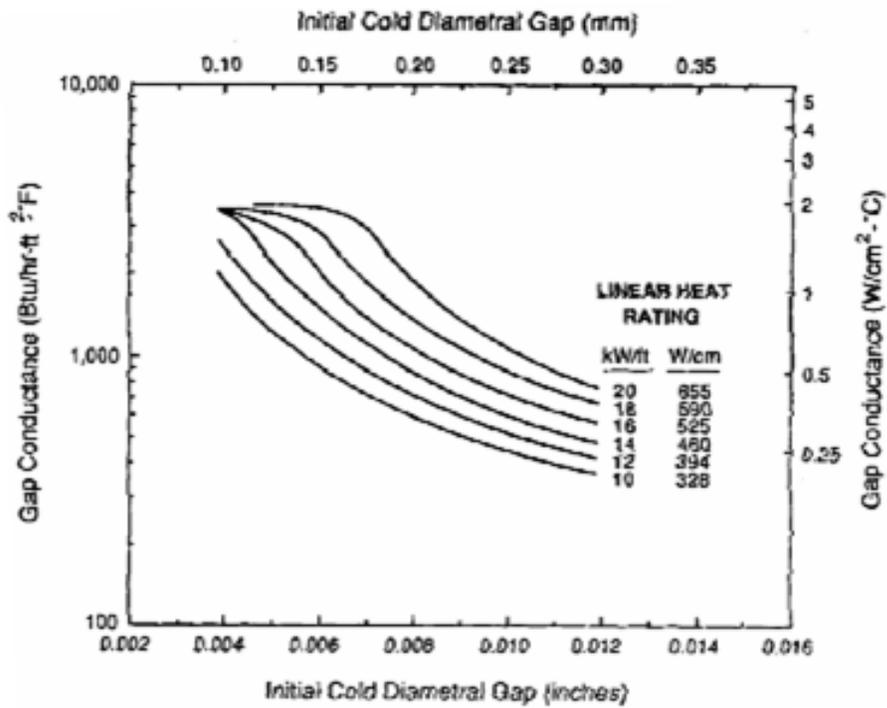


FIGURE 42 – Evolution du H_{gap} avec la puissance

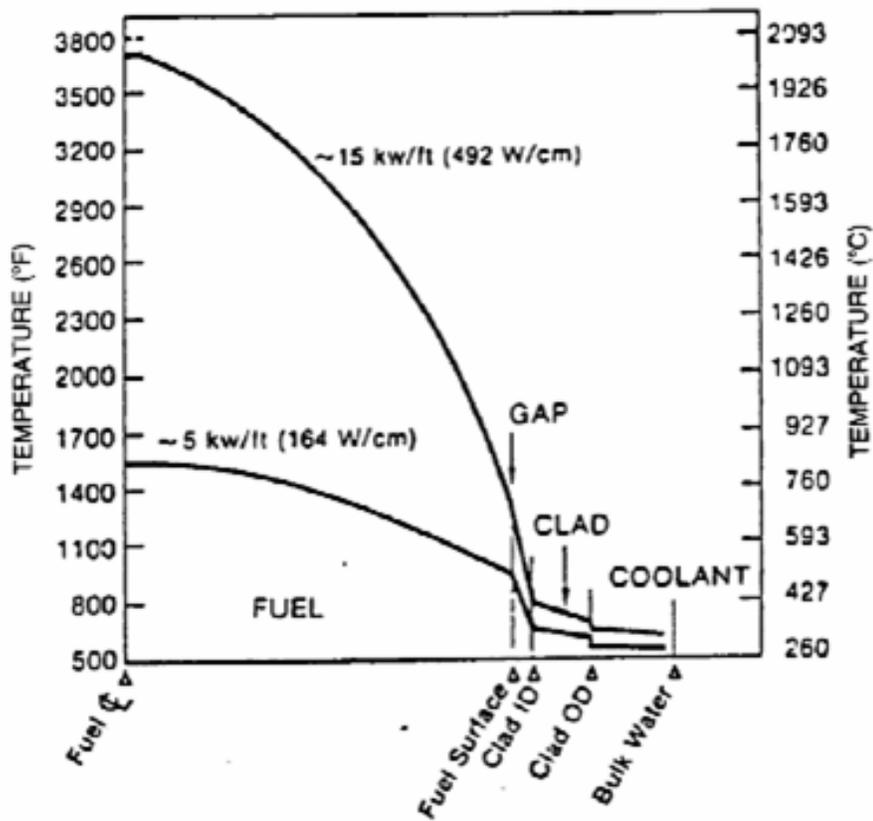


FIGURE 43 – Profil radial de température dans le crayon en fonction de la puissance linéique

9 Thermohydraulique cœur

9.1 Evacuation de la puissance

Les équations de bilan de masse et d'énergie sont utilisées pour le dimensionnement en considérant soit l'écoulement moyen, soit l'écoulement dans le canal chaud.

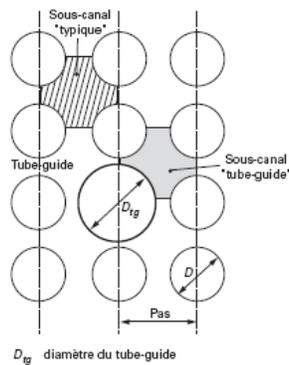


FIGURE 44 – Sous-canaux d'un assemblage

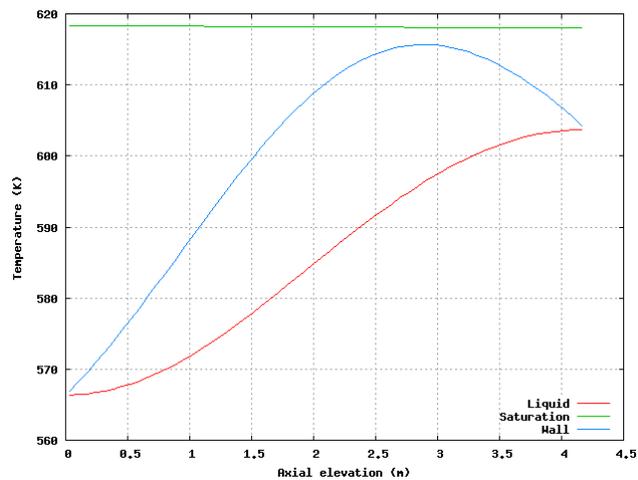


FIGURE 45 – Profil axial de température dans un canal moyen REP (conditions nominales)

9.2 Flux critique

L'échange thermique par ébullition nucléée est très efficace (du fait de la chaleur latente) mais il présente deux inconvénients majeurs :

corrosion la nucléation augment sensiblement le dépôt des impuretés et substances en solution. Cela peut notamment conduire à l'*Axial Offset Anomaly* par concentration de bore sur le gainage.

flux critique limite du régime d'ébullition nucléée ou *Departure from Nucleate Boiling*

Le *flux critique* ou *Critical Heat Flux* est la principale limite thermique du réacteur. Le critère utilisé est le Rapport de Flux Thermique Critique, ou Rapport d'Echauffement Critique, ou *DNB Ratio* :

$$RFTC = \Phi_{\text{critique}} / \Phi \quad (24)$$

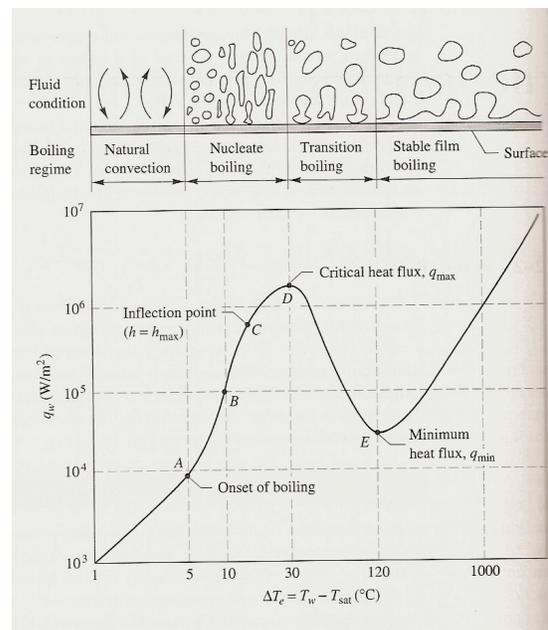


FIGURE 46 – Ébullition en vase (courbe de Nukiyama)

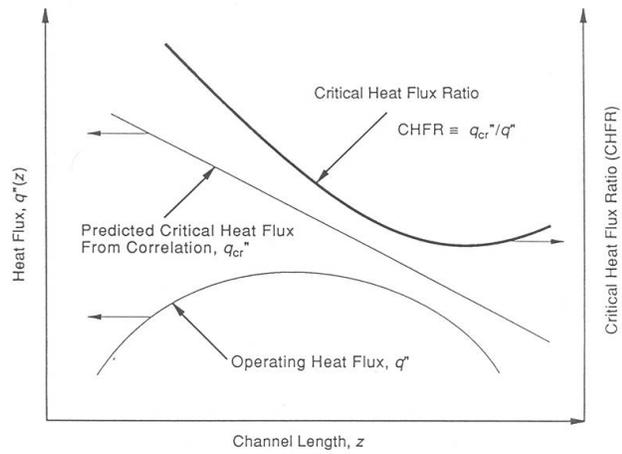


FIGURE 47 – Evolution axiale du RFTC dans le cœur REP

10 Générateur de Vapeur

Objectif

Transférer l'énergie du primaire au secondaire.

10.1 Principe de fonctionnement

Le Générateur de Vapeur est un échangeur thermique qui fonctionne en convection forcée du côté primaire et en convection naturelle du côté secondaire (ébullition).

Le fluide primaire circule à l'intérieur des tubes en U. On parle de *jambe chaude* et de *jambe froide* pour désigner les deux parties verticales des tubes. La zone des cintres est appelée *chignon*.

Le fluide secondaire circule à l'extérieur des tubes, dans l'enveloppe du GV. La vapeur et le liquide sont séparés en partie supérieure (séparateurs et sécheurs). La fraction liquide restante ($x \approx 0.2$, $\alpha \approx 0.8$) recircule avec l'eau alimentaire.

Le faisceau de tubes est maintenu par :

plaques entretoises ou grilles, qui permettent également d'homogénéiser le fluide secondaire,

barres anti-vibratoires dans les cintres,

plaque tubulaire dans laquelle les tubes sont fixés (étanchéité primaire-secondaire).

Les tubes sont régulièrement inspectés afin de prévenir les fuites primaire-secondaire. Lorsque des fissures sont détectées, les tubes sont bouchés (surdimensionnement initial du nombre de tubes).

Pour optimiser l'échange thermique global, certains GV (ex : N4) disposent d'un pré-chauffeur côté jambe froide : l'eau d'alimentation (sous-saturée) n'est pas mélangée directement à l'eau de recirculation.

10.2 Estimation de l'échange thermique

Un des objectifs du concepteur est d'obtenir un coefficient d'échange thermique maximal. Le coefficient d'échange global du GV peut s'écrire sous la forme :

$$\frac{1}{H_{GV}} = \underbrace{\frac{1}{H_1}}_{\text{interne}} + \underbrace{\frac{e}{\lambda}}_{\text{paroi}} + \underbrace{\frac{1}{H_2}}_{\text{externe}} + \underbrace{f}_{\text{fouling}} \quad (25)$$

où H_1 est donné par une corrélation d'échange thermique par convection forcée (ex : Dittus-Boelter) et H_2 est donné par une corrélation d'échange thermique en ébullition nucléée (ex : Jens-Lottes).

Le coefficient de *fouling* représente l'effet des dépôts sur la face externe des tubes.

En pratique on cherche évidemment à réduire la résistance thermique des tubes ($\frac{e}{\lambda}$). Le diamètre des tubes est donc important (≈ 20 mm) afin de limiter leur épaisseur (≈ 1 mm).

10.3 Taux de recirculation

Le *taux de recirculation* mesure la fraction de débit massique qui circule dans l'échangeur, i.e. dans le *downcomer* (DC), par rapport au débit massique d'alimentation (*feedwater*, FW). En régime stationnaire, le débit de vapeur égale le débit d'alimentation.

Le bilan de masse et d'énergie au secondaire du GV permettent de montrer que le taux de recirculation peut s'écrire sous la forme :

$$R = \frac{\dot{m}_{DC}}{\dot{m}_{FW}} \quad (26)$$

$$= \frac{\dot{m}_{DC} h_{lv}}{P} \left(1 - \frac{h_{FW} - h_{l,sat}}{h_{lv}} \right) \quad (27)$$

où P est la puissance thermique échangée avec le primaire et h_{FW} est l'enthalpie de l'eau alimentaire.

10.4 Modes d'usure

Les mécanismes à l'origine de la dégradation des tubes de GV sont :

corrosion primaire induit des fissuration dans les zones à forte contrainte (cintrage en particulier),

corrosion secondaire principalement au niveau de la plaque à tubes (fort dépôt car écoulement à faible vitesse),

denting corrosion localisée au niveau des points de contact avec les plaques support,

fretting vibration des tubes dans le chignon (interaction fluide-structure) et usure au contact des barres anti-vibratoires,

corps migrants contact, vibration.

Il faut donc dimensionner le GV pour lui donner à la fois de bonnes performances thermiques et une sûreté suffisante.

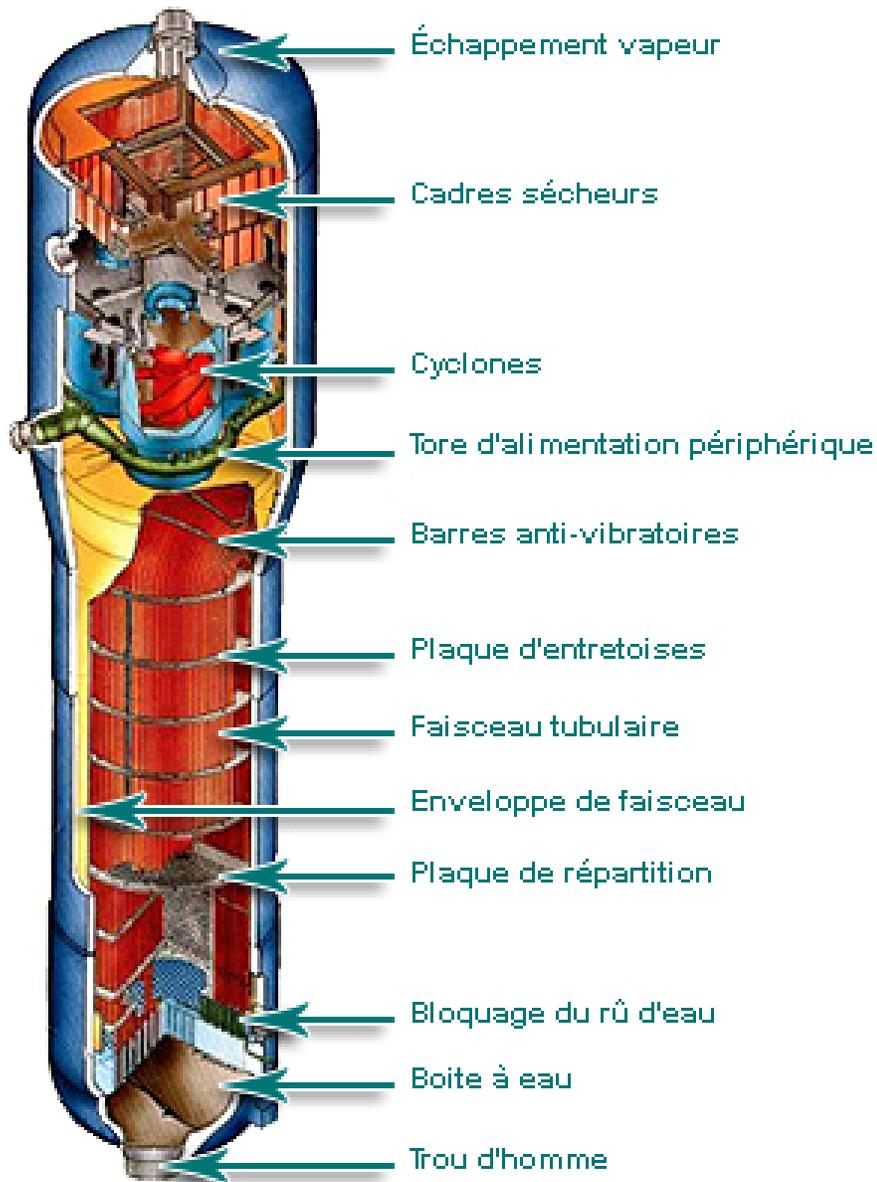


FIGURE 48 – Vue éclatée d'un GV à tubes en U

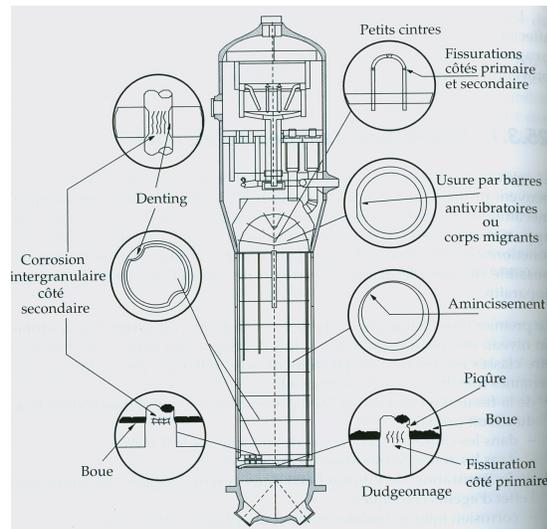


FIGURE 49 – Modes d’usure des Générateurs de Vapeur (d’après Libmann)

A Ressources documentaires

Références

- [1] <http://nucleaire.cea.fr>
- [2] <http://www.sfen.org>
- [3] <http://energie.edf.com/en-direct-de-nos-centrales-45641.html>
- [4] Livrets thématiques sur l'énergie, http://www.cea.fr/le_cea/publications/livrets_thematiques
- [5] P. Reuss, *Parlons nucléaire en 30 questions*, La documentation française
- [6] *Electronucléaire, une présentation par des physiciens*, Publication du Cercle d'Etudes sur l'Energie Nucléaire
- [7] P. Reuss, *La neutronique*, Que sais-je?
- [8] Les coûts de référence de la production électrique, <http://www.developpement-durable.gouv.fr>, 2008
- [9] World Energy Outlook, International Energy Agency, <http://www.worldenergyoutlook.org>
- [10] Memento sur l'énergie, édition 2011, CEA