

CHAPITRE I

LES FILIÈRES NUCLÉAIRES

"Et conflagunt gladios suos in vomeres"¹
Isaïe, 2-4

C'est par une destruction effroyable que l'énergie nucléaire a fait son entrée dans l'univers technologique. Mais heureusement et avec une rapidité remarquable, elle est devenue une source essentielle d'énergie électrique tout en présentant un potentiel important de développement.

1. GÉNÉRALITÉS

1.1 Constitution

Dans toute centrale électrogène, trois éléments essentiels apparaissent :

- une chaudière qui reçoit de l'énergie thermique,
- un groupe turboalternateur qui fournit de l'énergie électrique,
- un condenseur² qui sert à évacuer l'énergie thermique *non rentable* du fluide de travail qui parcourt un cycle fermé.

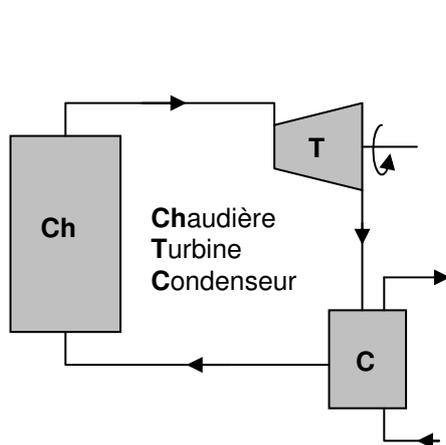


Figure I.1 – Schéma de principe d'une centrale électronucléaire

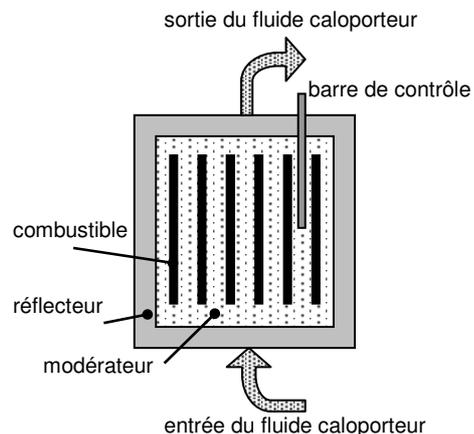


Figure I.2 – Schéma d'un cœur de réacteur nucléaire.

Le fluide de travail, le plus souvent de l'eau, subit un cycle au cours duquel il reçoit de l'énergie thermique dans un échangeur de chaleur puis transmet une grande partie de cette

¹ "Et ils transformèrent leurs épées en socs de charrue"

² Cet élément n'est présent que si le fluide de travail présente un changement de phase, de vapeur à liquide, ce qui est le cas de l'eau, fluide le plus couramment utilisé.

énergie à une turbine. Celle-ci transforme cette énergie en travail mécanique qui est converti par un alternateur en électricité. Il n'y a pas, dans le principe, de différences fondamentales entre une centrale électrogène classique et nucléaire. Seules les chaudières diffèrent véritablement, principalement à cause du combustible utilisé.

Dans le cas d'une centrale thermique *classique*, la chaudière reçoit de l'énergie obtenue en brûlant un combustible fossile (pétrole, charbon, gaz). La puissance de la centrale est réglée par le débit de celui-ci. Les déchets, principalement les fumées, sont évacués en continu durant le fonctionnement de la chaudière.

Dans le cas d'une centrale électronucléaire, la chaudière possède au démarrage tout le combustible. La puissance du réacteur est modulée grâce à des barres de contrôle qui permettent de faire varier l'activité neutronique du cœur et ainsi de consommer plus ou moins de matière fissile. Les déchets, principalement les produits de fission, sont produits en continu et restent confinés dans la cuve du réacteur.

1.2 Les différentes filières

Les éléments qui interviennent dans la conception de la chaudière d'une centrale électronucléaire sont fondamentaux; c'est eux qui vont caractériser un type de centrale. Ces éléments sont au nombre de trois :

- 1) le **combustible** : ce peut être de l'uranium naturel, de l'uranium enrichi en isotope 235 ou bien du MOX, un mélange d'oxydes d'uranium et de plutonium,
- 2) le **modérateur** : nous en avons étudié particulièrement trois dans le chapitre sur la neutronique; il s'agit de l'eau légère, de l'eau lourde et du graphite. Mais on peut aussi envisager l'absence de modérateur de façon à conserver un spectre de neutrons rapides,
- 3) le **fluide caloporteur** : c'est un fluide qui doit avoir des qualités thermohydrauliques indéniables mais aussi ne pas trop se dégrader lorsqu'il est soumis à un fort flux neutronique. L'eau légère ainsi que l'eau lourde, bouillante ou sous pression, apparaissent comme des solutions intéressantes. On peut aussi envisager certains gaz comme le dioxyde de carbone ou bien l'hélium. Il est possible aussi d'utiliser des métaux liquides à basse température, comme le sodium.

De nombreux travaux et tests de laboratoire ont permis de dégager un certain nombre de combinaisons acceptables tant sur le point de la neutronique que sur celui de la thermohydraulique. Ensuite les industriels se sont mis au travail pour définir des *filières* rentables. Finalement 7 combinaisons ont donné lieu à la réalisation de réacteurs industriels en série. Une même filière peut porter des noms différents, suivant l'origine du constructeur. C'est le cas par exemple de la filière à eau pressurisée qui s'appelle PWR chez les anglo-saxons, REP en France ou VVER en Russie. Dans les trois cas, c'est une filière qui utilise de l'uranium légèrement enrichi en isotope 235, de l'eau légère comme modérateur, ce dernier servant aussi de fluide caloporteur. Les principales différences concernent la puissance du réacteur et les systèmes de contrôle-commande.

Le tableau I-1 donne les caractéristiques des 7 filières industrielles qui existent ou ont existé. Nous allons voir à présent plus en détail les caractéristiques de la plupart d'entre elles.

combustible	modérateur	fluide caloporteur	nom	pays développeur
uranium naturel	eau lourde	D ₂ O sous pression	CANDU PHWR	Canada USA
	graphite	CO ₂	UNGG MAGNOX	F GB
uranium enrichi MOX	eau légère	H ₂ O sous pression	PWR REP VVER	USA F Russie
		H ₂ O bouillante	BWR	USA
	graphite	H ₂ O bouillante	RBMK LWGR	Russie
		CO ₂	AGR	GB
uranium+plutonium	(absence)	sodium	FBR RNR	USA F

AGR	Advanced Gas-cooled Reactor
BWR	Boiling Water Reactor
CANDU	Canadian Deuterium Uranium
FBR	Fast Breeder Reactor
LWGR	Light Water Graphite Reactor
PHWR	Pressurised Heavy Water Reactor
PWR	Pressurised Water Reactor
RBMK	Reaktor Bolshoy Moshchnosti Kanalniy
REP	Réacteur à Eau sous Pression
RNR	Réacteur à Neutrons Rapides
UNGG	Uranium Naturel Graphite Gaz
VVER	Vode Vodjanie Energitcheskie Reaktor

Tableau I.1 – Caractéristiques des principales filières électronucléaires.



Figure I.3 – Les 4 REP de la centrale de Dampierre-en-Burly au bord de la Loire (Loiret).

2. FILIERE GRAPHITE-GAZ

2.1 Historique

C'est aux États-Unis que la première *pile atomique*³ divergea, le 2 décembre 1942, suite aux travaux de l'équipe d'Enrico Fermi. Elle était constituée d'un empilement de briques en graphite et d'éléments d'uranium naturel sous forme métallique et sous forme d'oxyde. La puissance libérée n'était que de quelques watts et aucun fluide caloporteur n'évacuait la chaleur ainsi produite. Cette structure n'était entourée d'aucune protection contre les rayonnements.

C'est en Grande-Bretagne que fut construit le premier réacteur commercial. Il s'agit de Calder Hall, connecté au réseau électrique en 1956 et arrêté en 2003 après 47 années de bons et loyaux services. Ce réacteur appartenait à la filière **MAGNOX** pour *MAGnésium-Non-OXidising*, termes caractérisant la nature de la gaine entourant le combustible. Le fluide caloporteur est du gaz carbonique. Quatre centrales équipées de ce type de réacteurs sont toujours en fonctionnement au Royaume-Uni.

Cette filière a mué en **AGR**, pour *Advanced Gas-cooled Reactor*, lorsque de l'uranium légèrement enrichi a été utilisé en remplacement des barreaux d'uranium naturel.

Après la deuxième guerre mondiale, la France ne disposant pas d'usine d'enrichissement de l'uranium, c'est une filière à uranium naturel qui a été développée. Le modérateur ne pouvant être de l'eau légère (à cause du bilan neutronique), et l'eau lourde étant trop chère, c'est le graphite qui fut choisi pour des raisons de prix et d'usinage. L'hélium étant trop coûteux, le choix du fluide caloporteur s'est porté sur le gaz carbonique. Cette combinaison a été appelée filière **UNGG** pour *Uranium Naturel, Graphite, Gaz*. Dans cette filière, la gaine qui entoure le combustible est faite d'un alliage de magnésium et de zirconium.

Les premiers réacteurs furent construits à Marcoule (G1, G2, G3) afin de tester la filière et de fournir du plutonium à usage militaire. Ensuite furent construites six centrales électrogènes sur le territoire national et une en Espagne (Vandellos, 480 MW_e, MSI : 1972, arrêt : 1989). Plus aucun de ces réacteurs n'est en fonctionnement aujourd'hui.

nom de la centrale	puissance électrique MW _e	date de mise en service industriel MSI	date d'arrêt
Marcoule G1	2	1956	1968
Marcoule G2	38	1959	1980
Marcoule G3	38	1960	1984
Chinon 1	70	1963	1973
Chinon 2	210	1965	1985
Chinon 3	480	1966	1990
Saint-Laurent 1	480	1969	1990
Saint-Laurent 2	515	1971	1992
Bugey 1	540	1972	1993

Tableau I.2 – Réacteurs de la filière UNGG en France.

³ Le terme *pile* provient d'un empilement de barres de graphite et d'uranium. Le terme *atomique* est quant à lui mal approprié. Il vaut mieux utiliser le mot *nucléaire* car l'énergie provient du réarrangement des nucléons et non pas des atomes qui sont sécables.

En Union Soviétique, une filière utilisant le graphite comme modérateur, mais de l'eau bouillante comme fluide caloporteur, fut développée. C'est la filière **RBMK** (ou **LWGR**) discutée par ailleurs.

Les premières réalisations, quel que soit le pays, servirent à produire à la fois de l'électricité mais aussi du plutonium à usage militaire. Le nom du premier réacteur RBMK, *Atom Mirnyy*, c'est-à-dire "atome pour la paix", ne doit pas masquer la réalité.

2.2 Caractéristiques de la filière

L'élément fondamental de cette filière est le graphite qui sert de modérateur. Il est certes moins efficace sur ce plan que l'hydrogène mais il ne nécessite cependant que 115 collisions pour thermaliser des neutrons rapides de 2 MeV.

Un avantage du graphite est la possibilité de tenir le bilan neutronique avec de l'uranium naturel. En effet sa section efficace de capture des neutrons thermiques ($\sigma_c=0,00337$ barn) est très faible. De plus le graphite est facile à mettre en œuvre et son coût est réduit comparé à l'eau lourde, seul autre modérateur permettant une réactivité positive avec de l'uranium naturel.

Les deux filières MAGNOX et UNGG, utilisent de l'uranium naturel comme combustible tandis que la filière AGR consomme de l'uranium légèrement enrichi (2,5 à 3,5 % d'isotope 235) ainsi que la filière RBMK (1,8 %). Le chargement et le déchargement du combustible peuvent avoir lieu alors que le réacteur est en fonctionnement. Ceci est économiquement très important car le faible taux de combustion (cf. ci-dessous) oblige l'exploitant à de fréquentes opérations de rechargement.

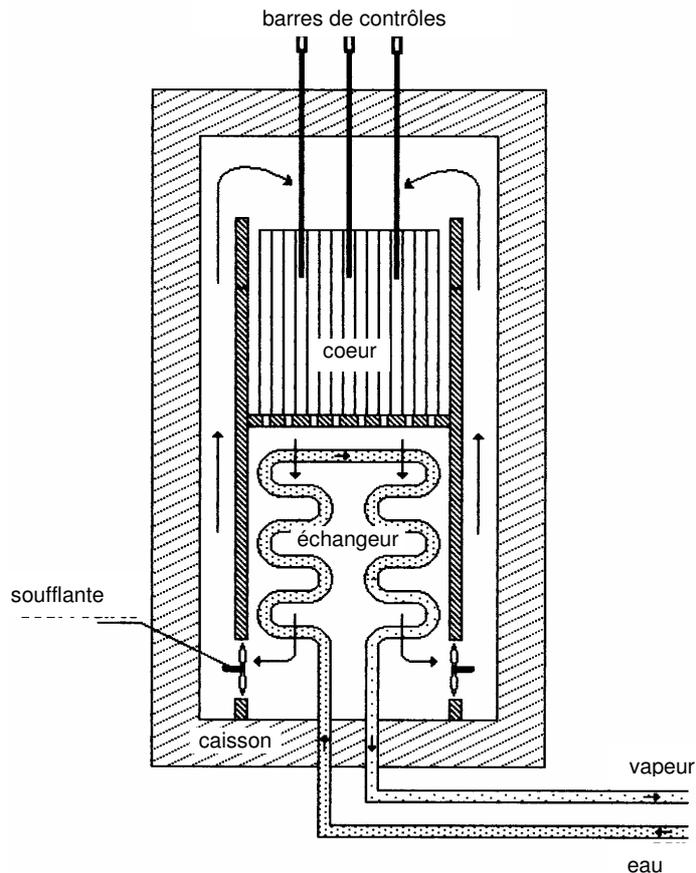
Cette filière a cependant certains inconvénients :

- Il est nécessaire d'utiliser l'uranium sous forme d'un alliage métallique (Sicral F1) pour tenir le bilan neutronique. En effet le dioxyde d'uranium UO_2 est trop absorbant pour les neutrons : ralentis par l'oxygène du combustible, ceux-ci ont une probabilité importante d'être capturés par l' $U238$ à cause des bandes de résonance de ce dernier. Malheureusement l'uranium sous forme métallique ne doit pas dépasser 650°C sous peine de contraintes trop importantes au niveau des gaines, l'uranium changeant alors de maille cristalline avec risque de déformation de l'élément combustible. Cette limitation a pour conséquence une température limitée du fluide caloporteur, température qui dépasse difficilement 400°C. Le rendement thermodynamique s'en ressent.
- Le ralentissement des neutrons nécessite un volume relativement important de graphite : le nombre de collisions nécessaires pour ralentir les neutrons ($n_c=115$) et la longueur de migration de ceux-ci ($L_m=61,8$ cm) sont bien plus grands qu'avec l'eau légère (cf. tome I, tableau III.10 p.93). Ceci conduit à un cœur volumineux et des frais de génie civil importants.
- Le **taux de combustion**⁴ ou **burn-up**, qui est la quantité d'énergie que l'on peut extraire d'une tonne de combustible nucléaire, doit être inférieure à 6 GWj/t. Au-delà, la pression exercée par les produits gazeux de fission peut entraîner la rupture des gaines des cartouches de combustible.

⁴ On utilise aussi, pour les combustibles métalliques, la notion de FIMA (*Fission per Initial Metallic Atom*) avec la correspondance suivante : 1%FIMA = 9,6 GWj/t de métal.

2.3 Schéma du réacteur de Bugey 1

Les éléments combustibles sont des barreaux creux gainés intérieurement et extérieurement d'un alliage de magnésium. La gaine est munie de fines ailettes pour accroître les échanges thermiques. Ces éléments sont placés dans des canaux verticaux pratiqués dans un empilement de graphite. De puissants ventilateurs forcent le dioxyde de carbone à pénétrer par le haut dans ces canaux. Au contact de la gaine des éléments combustibles, il s'échauffe par convection forcée. Il rencontre alors les échangeurs de chaleur intégrés au caisson. Refroidi, le gaz carbonique est alors renvoyé par les soufflantes en haut du cœur.



puissance thermique	1920 MW
puissance électrique nette	540 MW
fluide caloporteur	CO ₂
température à l'entrée du cœur	225 °C
température à la sortie du cœur	398 °C
pression	26 bars
pression de la vapeur en sortie échangeur	35 bars

Figure I.4 – Schéma et caractéristiques du réacteur de Bugey 1.



Figure I.5 – Centrale du Bugey. On aperçoit à droite le bâtiment du réacteur UNGG Bugey 1.

2.4 Filière AGR

Pour accroître le rendement thermodynamique de la centrale, il faut augmenter la température de la source chaude, c'est-à-dire la température du fluide caloporteur ce qui a pour conséquence un accroissement de la température au sein du combustible. Comme l'uranium métallique est limité à 650°C, on s'est orienté vers l'oxyde d'uranium qui tient sans problème à des températures plus élevées. Le fluide caloporteur est du gaz carbonique sous pression et le modérateur du graphite, comme dans la filière UNGG.

Cette solution, choisie par la Grande-Bretagne, a donné lieu en 1965 à un prototype de 30 MW_e construit à *Windscale*. Cette filière, nommée AGR pour *Advanced Gas-cooled reactor*, s'est concrétisée par une série de 14 réacteurs de 626 MW_e qui sont toujours en fonctionnement. Le dernier réacteur a été couplé au réseau en 1990 (centrale de *Torness* en Écosse). Aucun autre réacteur de ce type n'est envisagé.

Le combustible est constitué de pastilles d'oxyde d'uranium enrichi à 2,2% en moyenne en isotope 235, pouvant atteindre des températures au cœur de 1300°C. Cet enrichissement est rendu nécessaire pour contrebalancer les captures de neutrons par le dioxyde d'uranium et l'acier inoxydable des gaines. Ces dernières peuvent tenir jusqu'à 825°C.

Le combustible est prévu pour rester 5 ans dans le réacteur et fournir 18 GWj/t.

Le chargement et le déchargement du combustible peuvent être réalisés en marche.

Le fluide caloporteur est du gaz carbonique qui peut atteindre 650°C à la sortie du cœur ce qui permet d'atteindre un rendement thermodynamique d'environ 40%. Le gaz carbonique est renvoyé à l'entrée du cœur à la température de 287°C par de puissantes soufflantes. Il est confiné dans un caisson en béton précontraint sous une pression de 43 bars. Ce caisson est muni d'un matériau isolant revêtu de plaques d'acier pour le séparer du gaz carbonique. Les générateurs de vapeur sont situés à l'intérieur du caisson.

Un problème rencontré durant l'exploitation de ce type de réacteurs est l'oxydation du graphite et de l'acier par le gaz carbonique à haute température.

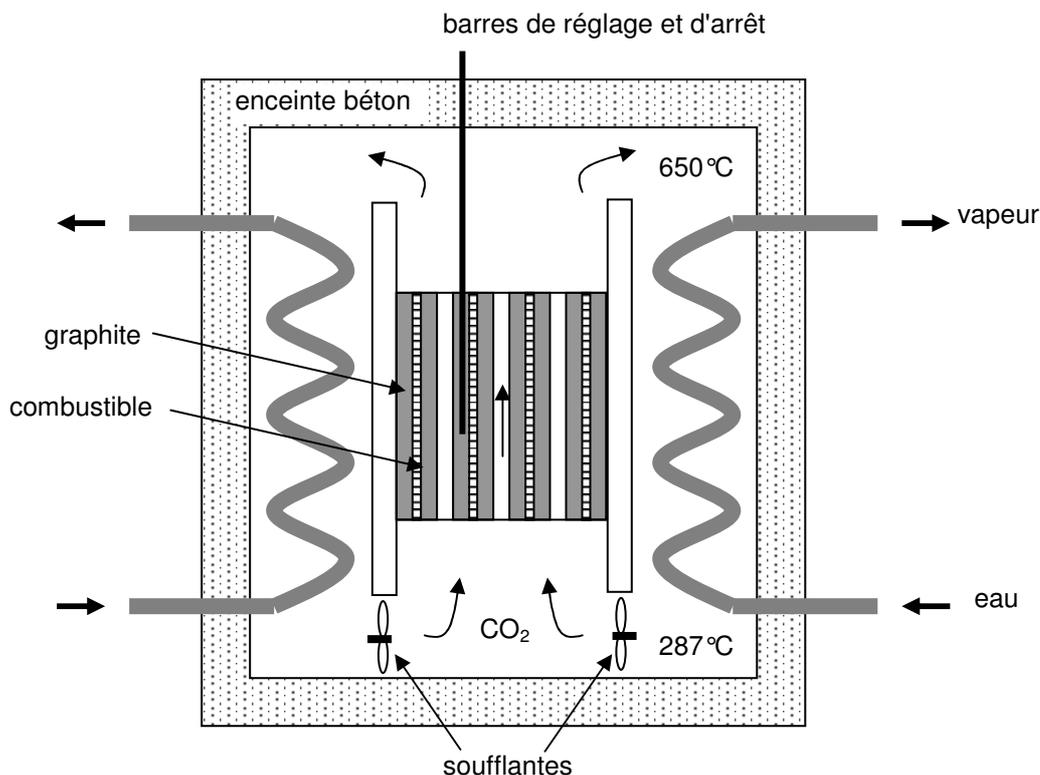


Figure I.6 – schéma de principe d'un réacteur AGR.

3. FILIERE RBMK

3.1 Description

Les RBMK (*Reaktor Bolshoy Moshchnosti Kanakniy* : réacteur de grande puissance à canaux) sont des réacteurs à tubes de force refroidis à l'eau ordinaire bouillante et modérés au graphite.

Un cylindre de 12 m de diamètre et 8 m de hauteur en graphite est traversé de haut en bas par 1693 tubes de force contenant les éléments combustibles (de l'oxyde d'uranium enrichi à 1,8 %, gainé par un alliage de zirconium-niobium). Le refroidissement de ces éléments est assuré par une circulation d'eau qui bout à 290 °C dans les tubes de force en remontant le long des crayons combustibles. L'énergie dégagée dans le graphite est évacuée vers les tubes de force seulement par conduction. Aussi la température du graphite peut-elle atteindre 760 °C en certains endroits.

Le contrôle de la réaction est assuré par 211 barres absorbantes pouvant se déplacer dans des tubes de force prévus à cet effet. Notons (et cela aura une importance capitale dans l'accident de Tchernobyl) que l'extrémité inférieure de ces barres est en graphite.

Le chargement et le déchargement des éléments combustibles a lieu alors que le réacteur est en fonctionnement, ce qui permet d'optimiser la récupération du plutonium à des fins militaires.

Il n'existe pas d'enceinte de confinement de la partie nucléaire du réacteur.

Ces réacteurs ont été construits par *Atomenergo Export*. Depuis 2001, la gestion de l'ensemble du parc des centrales électronucléaires russes a été confiée à *Rosenergoatom*, filiale de *Atomprom*⁵. Il en existe encore 16 en fonctionnement.

nom	pays	nombre de tranches	puissance MW _e	date de MSI	date d'arrêt
Bilibino	Russie	4	11	1974-1976	
Sosnovyj Bor	Russie	4	925	1973-1981	
Kursk	Russie	4	925	1976-1985	
Tchernobyl	Ukraine	4	950	1977-1983	1996-1991-1986-2000
Smolensk	Russie	3	925	1982-1990	
Ignalina	Lituanie	2	1450	1985 -1987	2004-(2009)

Tableau I.3 – Centrales de la filière RBMK.

Une des caractéristiques neutroniques de ce type de réacteur est son **coefficient de vide positif**. En effet, l'eau légère, qui sert ici de fluide caloporteur, a tendance à absorber des neutrons⁶ ce qui nécessite, pour obtenir une réactivité positive, l'enrichissement du combustible en matériau fissile (U235). Mais si, pour une raison quelconque, la température de cette eau se met à croître, sa densité va diminuer. Donc, pour un volume donné, le nombre de noyaux d'hydrogène va baisser et par suite, le nombre de neutrons absorbés dans ce même volume va lui aussi baisser. Le modérateur, constitué de graphite, restant

⁵ *Atomprom* est une holding d'état regroupant *Rosenergoatom*, *Tekhsnabexport* et *TVEL* (combustible), *Atomstroïexport* (construction de centrales).

⁶ Ces captures sont dues aux atomes d'hydrogène de l'eau.