

# Les cycles thermodynamiques des centrales nucléaires

© Transvalor - Presses des Mines, 2010

60, boulevard Saint-Michel - 75272 Paris cedex 06 - France

email : [presses@ensmp.fr](mailto:presses@ensmp.fr)

<http://www.ensmp.fr/Presses>

© Photos de couverture : centrale de Rancho Seco, Californie, photo de P. Orvin.

Extrait du schéma sous Thermoptim<sup>®</sup> du modèle du réacteur Superphénix, R. Gicquel.

ISBN : 978-2-911256-33-2

Dépôt légal : 2010

Achévé d'imprimer en 2010 (Paris)

Tous droits de reproduction, de traduction, d'adaptation et d'exécution réservés pour tous les pays.

# Les cycles thermodynamiques des centrales nucléaires

Ouvrage coordonné par

Thibaud Normand  
Jessica Andreani  
Vincent Tejedor

COLLECTION TECHNOLOGIES

Paris, Presses des Mines

**Dans la même collection :**

Guillaume Denis

Jeux vidéo, enjeux éducatifs

*Une application à l'enseignement de la musique jazz*

M. Santamouris, J. Adnot, S. Alvarez, N. Klitsikas, M. Orphelin, C. Lopes, F. Sanchez

Cooling the cities / Rafrâichir les villes

Sophie Rémont, Jérôme Gosset, Roland Masson

Le démantèlement des installations nucléaires

Jean-Jacques Bézian, Pierre Barlès, Claude François, Christian Inard

Les émetteurs de chaleur

*Étude comparée*

# Préface

Le monde est aujourd'hui confronté à une double problématique Énergie-Climat pour assurer un développement durable de son économie. Face à la croissance démographique et aux légitimes aspirations au développement des populations n'ayant aujourd'hui que peu accès à l'énergie, le problème se réduit au premier ordre à trouver réponse à la question : comment à moyen terme (2050) produire deux fois plus d'énergie en réduisant notablement (facteur 4) les rejets de CO<sub>2</sub> induits ?

On mesure bien l'ampleur du défi en rappelant que, de façon remarquablement constante depuis plus de vingt ans, l'approvisionnement mondial en énergie primaire est à environ 80% issu des ressources fossiles (charbon, pétrole, gaz) responsables de la majeure partie des rejets anthropiques de CO<sub>2</sub>. Il n'y a évidemment pas de solution simple à un tel défi et c'est un ensemble de politiques énergétiques coordonnées au niveau mondial, faisant appel à des idées et des technologies nouvelles, qui est susceptible d'y répondre. Économies d'énergie, développement de l'électricité décarbonée (hydraulique, renouvelable, nucléaire), capture et séquestration du CO<sub>2</sub> feront partie de la panoplie des solutions.

L'électricité nucléaire représente aujourd'hui 15% de la production mondiale d'électricité et la plus grande partie de l'énergie non carbonée. Elle est amenée à se développer à nouveau dans les années à venir pour fournir plus largement une électricité de base non carbonée.

Est-il nécessaire de rappeler que le rendement thermodynamique des équipements de transformation de la chaleur en électricité est un paramètre dimensionnant des systèmes de production électronucléaires ? L'étude « les cycles thermodynamiques des centrales nucléaires » réalisée dans le cadre de l'enseignement sur les systèmes énergétiques de l'École Mines ParisTech présente de façon complète les technologies et les méthodes de simulation utilisées pour choisir les cycles thermodynamiques les mieux adaptés aux diverses filières nucléaires utilisées. Au-delà des évolutions historiques (l'électronucléaire a déjà plus de cinquante ans d'expérience) l'étude s'ouvre également aux systèmes du futur qui accompagneront le développement de l'énergie nucléaire dans les décennies à venir. Elle représente une référence utile aussi bien à la formation de nouveaux ingénieurs qu'à la réflexion sur les outils de production de demain, propres à faire face aux grands challenges de l'énergie et de la protection du climat.

Pour conclure, rappelons que les systèmes électronucléaires du futur s'attachent principalement à résoudre les problèmes de ressources et de déchets nucléaires. De nombreuses technologies permettant de préserver les unes tout en réduisant les autres (recyclage du combustible usé, incinération des déchets à vie longue...) sont en développement. Un bon rendement thermodynamique du système est aussi un moyen de répondre à la source à ce double enjeu.

*Philippe PRADEL,  
CEA, Président de la Société Française d'Énergie Nucléaire,  
Janvier 2010*

# Avant-propos

Ce livre est le résultat d'un travail collaboratif réalisé par deux promotions successives d'ingénieurs-élèves du Corps des Mines, dans le cadre d'un enseignement sur les systèmes énergétiques dispensé par M. Renaud Gicquel, professeur à l'École Mines ParisTech.

Ce projet a représenté environ 2 000 heures de travail et a abouti à la rédaction d'un rapport par chaque promotion, combinant des approches technique et socio-économique sur des objets d'étude distincts. Un travail d'édition a consisté à harmoniser et réorganiser les apports de chacun, de sorte qu'il a été jugé difficile d'attribuer des passages précis aux différents contributeurs.

Les personnes suivantes ont participé à la rédaction de cet ouvrage :

Jessica Andreani	Frédéric Baudouin
Bastien Beley	Benjamin Bertrand
Grégoire Deyirmendjian	Alexandre Dozières
Julie Dubois	Pierre-Louis Dubourdeau
Nadia Faure	Etienne Hans
Colas Hennion	Eric Huber
Jean-François Jamet	Florien Kraft
Vincent Le Biez	Eugénie Le Quéré
Maxime Leclère	Serge Lhermitte
Franck Lirzin	Thibaud Normand
Pierre Perdiguier	David Parlongue
Antoine Pellion	Xavier Piccino
Antonin Pottier	Guillaume Prunier
Stéphane Reiche	François Rousseau
Delphine Ruel	Fabien Schilz
Vincent Tejedor	Ronan Venetz
Charles-Henri Weymuller	

Thibaud Normand, Jessica Andreani et Vincent Tejedor ont assuré le travail d'édition.



# Introduction

De la fascination pour une prouesse technologique qui symbolise la maîtrise de la matière par l'homme à l'inquiétude envers les conséquences de ce qui peut apparaître comme une expérience d'alchimiste, la production d'électricité d'origine nucléaire n'a cessé d'interpeller l'opinion publique depuis ses débuts il y a une cinquantaine d'années.

Notre pays est dans une situation tout à fait particulière dans ce domaine, en raison du recours massif au secteur nucléaire pour assurer notre indépendance énergétique. À ces questions d'indépendance vis-à-vis des produits pétroliers à la rareté souvent surestimée par le passé, s'ajoute aujourd'hui un défi plus essentiel avec l'impératif d'un changement de nos techniques et de nos comportements pour limiter notre impact sur le climat.

Le fait que le secteur nucléaire doive faire partie des solutions pour limiter nos émissions carbonées a été largement débattu dans de nombreux pays. La relance du secteur dans la dernière décennie, après une fin de XX<sup>e</sup> siècle en déclin, démontre que nombre d'États sont convaincus de l'importance du maintien d'une production d'électricité d'origine nucléaire, même s'il ne s'agit que d'une des nombreuses réponses à apporter au changement climatique. Le nucléaire ne constituera en effet qu'une faible part du bouquet énergétique futur, et le maintien au niveau mondial de la proportion d'électricité d'origine nucléaire est déjà un défi.

Pour répondre à ce défi, nous nous trouvons à une période charnière. La première génération de réacteurs, apparue dans les années 1950, a permis de faire émerger des concepts robustes parmi de nombreuses solutions techniques envisageables. La deuxième génération a été celle de l'industrialisation du secteur, avec notamment la constitution des parcs français et américains à partir des années 1970. Elle a fait progresser un concept éprouvé (réacteurs à eau légère) dans une démarche d'optimisation poussée qui a conduit aux réacteurs de troisième génération, au premier rang desquels l'EPR. Aujourd'hui, le nucléaire doit être une source d'énergie compétitive avec le charbon et le gaz, plus efficace sur le plan énergétique, plus sûre et plus respectueuse de l'environnement, depuis l'extraction de l'uranium jusqu'à la gestion des déchets. À cette fin, la quatrième génération de centrales nucléaires comprendra des ruptures technologiques plus fortes, et plusieurs concepts très différents sont en cours d'évaluation et pourraient à l'avenir coexister.



# Contexte nucléaire français

## 1.1 Les origines du secteur électro-nucléaire

### 1.1.1 Les pionniers

La radioactivité naturelle est découverte en 1896 par Henri Becquerel, qui a observé le rayonnement émis par l'uranium [1]. En 1898, Pierre et Marie Curie mettent en évidence deux nouveaux éléments radioactifs, le polonium et le radium, et donnent son nom à la radioactivité. Irène Curie et Frédéric Joliot poursuivent ces travaux en découvrant la radioactivité artificielle en 1934 : un noyau irradié par des rayonnements peut produire de nouveaux noyaux artificiels. À partir de 1934, l'italien Enrico Fermi entreprend de bombarder différents éléments avec des neutrons et obtient des résultats remarquables avec l'uranium, ce qu'Otto Hahn et Fritz Strassman interprètent en 1938 comme une fission du noyau d'uranium en deux éléments de tailles inégales, libérant une forte énergie. L'équipe de Frédéric Joliot confirme cette fission en 1939 et met en évidence le fait qu'elle produit des neutrons en nombre supérieur à ceux ayant permis la fission. Ils décrivent alors la possibilité d'une réaction en chaîne dans l'uranium : la fission de l'atome d'uranium produit des neutrons qui vont eux-mêmes entraîner une nouvelle fission. Les savants français entrevoient les deux applications qui peuvent en être faites : la fourniture d'énergie si la réaction est maîtrisée, la formation d'un engin explosif dans le cas où la réaction est exponentielle. Frédéric Joliot, Hans Halban, Lev Kowarski et Francis Perrin déposent ainsi en mai 1939 trois demandes de brevets sur ces applications, ce qui montre l'avance française dans le domaine nucléaire.

L'invasion allemande interrompt ces recherches et leur poursuite aura lieu aux Etats-Unis, où de nombreux scientifiques européens ont émigré. Enrico Fermi et Leo Szilard, à l'université de Chicago, imaginent un réacteur nucléaire reposant sur la réaction en chaîne : l'uranium à fissionner est placé entre des piles de graphite, dites modératrices, qui permettent de réguler la réaction en absorbant plus ou moins les neutrons émis. En novembre 1942, l'équipe de Fermi construit le premier réacteur nucléaire du monde : *Chicago Pile 1*. Il est mis en fonctionnement le 2 décembre 1942 : la réaction en chaîne n'est entretenue que quelques minutes, et sa puissance n'est que de 0,5 W, mais sa divergence permet de conforter la théorie sur les mécanismes de fission. Tous les réacteurs qui ont

suivi reposent sur le même principe fondamental de la régulation d'une réaction en chaîne nucléaire. La configuration du réacteur a en revanche évolué, notamment le matériau modérateur, le combustible fissile ou le fluide calorifugeur.

### 1.1.2 Premières applications militaires

La Seconde Guerre mondiale est marquée par la course à la bombe atomique, qui aboutit à la première explosion expérimentale le 16 juillet 1945 dans le désert du Nouveau-Mexique (bombe au plutonium), puis aux deux explosions sur le territoire japonais à Hiroshima (bombe à l'uranium enrichi) et Nagasaki (bombe au plutonium), les 6 et 9 août 1945.

Si l'uranium est un élément naturel, le plutonium est un élément artificiel produit par la réaction de fission de l'uranium. La pile de Fermi sert de modèle pour la construction, entre 1943 et 1944, de six réacteurs produisant le plutonium nécessaire à la bombe atomique. À travers le plutonium, produit de la réaction de fission contrôlée et combustible de la bombe, on observe déjà un lien entre les applications nucléaires civiles et militaires.

### 1.1.3 Naissance du secteur électro-nucléaire

À la fin de la guerre, le nucléaire apparaît comme un moyen nouveau de produire de l'énergie sous forme électrique et de subvenir ainsi à la demande énergétique croissante. En 1946, l'*Atomic Energy Act* fixe aux Etats-Unis les grandes lignes du développement du programme nucléaire civil. Cette date marque l'entrée du nucléaire dans sa phase commerciale. L'*Atomic Energy Commission* est créée pour concevoir les premières centrales nucléaires civiles. En 1951, le premier réacteur expérimental EBR1 est développé à la station d'essai d'Arco dans l'Idaho. Il génère une puissance de 100 kW. En 1954, cinq réacteurs prototypes sont mis à l'œuvre dans différentes filières. Le premier réacteur véritablement opérationnel est celui de Shippingport, en Pennsylvanie, qui est mis en service en décembre 1957. Il s'agit d'un Réacteur à Eau Pressurisée (REP) d'une puissance de 60 MW.

En Russie, les premiers réacteurs *Reaktor Bolshoy Moshchnosti Kanalniy*, soit réacteur de grande puissance à tube de force (RBMK) sont construits pour produire du plutonium militaire. La mise en service du réacteur d'Obninsk en 1954 fournit de l'électricité avec une puissance de 5 MW. Il peut être considéré comme le premier réacteur électro-nucléaire au monde, car il est le premier conçu dans le but de produire de l'électricité.

En 1955, le site de Calder Hall au Royaume-Uni accueille la première centrale britannique commerciale, équipée de la technologie Graphite-Gaz britannique (dite Magnox, *magnesium oxide* en anglais).

Le premier réacteur d'essai français est construit par Frédéric Joliot-Curie et Lew Kowarski au centre d'études du Commissariat à l'Énergie Atomique (CEA) de Fontenay-aux-Roses (Hauts-de-Seine). Cette pile atomique, dénommée Pile Zoé, lance son processus de réaction nucléaire en chaîne en décembre 1948. Ce

réacteur a pour but de placer la France dans le peloton des puissances nucléaires en fabriquant du plutonium pour la bombe atomique. En 1956, le réacteur G1, d'une puissance de 40 MW, est mis en marche au centre de recherche du CEA de Marcoule : il s'agit du premier réacteur français à produire non seulement du plutonium mais aussi de l'électricité. Il initie alors la filière française Uranium Naturel Graphite Gaz (UNGG) : deux autres réacteurs expérimentaux du CEA, les G2 et G3, suivent en 1959 et 1960, avant la construction de six réacteurs industriels exploités par EDF.

## 1.2 La constitution du paysage nucléaire français

### 1.2.1 Filières et générations de réacteurs

#### Filières nucléaires

On regroupe sous le label « filière de réacteurs nucléaires » l'ensemble des conditions techniques permettant d'obtenir et de contrôler la réaction nucléaire de fission en chaîne. Une filière de réacteurs est caractérisée par :

- la nature du combustible :
  - oxyde d'uranium naturel, plus ou moins enrichi,
  - mélange d'oxydes uranium-plutonium,
  - thorium,
  - autre combustible,
- la nature du modérateur pour les réacteurs à neutrons thermiques :
  - eau,
  - eau lourde,
  - graphite,
  - ou son absence dans le cas d'un réacteur à neutrons rapides,
- la nature du fluide caloporteur :
  - eau pressurisée,
  - eau bouillante,
  - gaz,
  - métal liquide (sodium, plomb),
  - sels fondus.

Le choix d'une filière de réacteurs engage un pays sur le très long terme. D'un point de vue technique, il existe beaucoup plus de points communs entre deux réacteurs de la même filière construits par deux entreprises différentes dans des pays différents (et donc autorisés à être exploités par des autorités de sûreté différentes) qu'entre deux réacteurs de filières différentes construits par le même industriel dans le même pays.

#### Réacteurs de première génération

La première génération de réacteurs nucléaires apparaît entre les années 1950 et 1960. En 1956, le réacteur G1, premier réacteur français producteur

d'électricité, est mis en service à Marcoule. Il est le premier représentant de la filière UNGG, mise au point par Électricité de France (EDF) et le CEA. Cette filière comptera neuf réacteurs, mis en service entre 1956 et 1972 (Bugey 1), les derniers atteignant la puissance de 540 MW.

Ce modèle de réacteur utilise comme combustible de l'uranium naturel (et non de l'uranium enrichi), les éléments combustibles étant placés dans des canaux percés dans les briques d'un empilement de graphite qui sert de modérateur des neutrons. Des ventilateurs de forte puissance, les « soufflantes », font circuler dans les canaux du réacteur un courant de gaz carbonique sous pression pour extraire la chaleur produite. Le gaz carbonique chauffé dans le réacteur passe dans des échangeurs de chaleur à l'extérieur de tubes dans lesquels l'eau se vaporise. Celle-ci va ensuite se détendre dans une turbine qui entraîne un alternateur. Le réacteur lui-même, composé de l'empilement de graphite et du combustible, est enfermé dans un caisson en béton précontraint de plusieurs mètres d'épaisseur, qui peut contenir soit tout le circuit de CO<sub>2</sub> et son échangeur (cas de St Laurent et Bugey), soit uniquement le cœur du réacteur, le circuit de CO<sub>2</sub> sortant alors du caisson pour traverser le générateur de vapeur (Chinon et Marcoule).

Cette filière 100 % française a été fortement soutenue par le général de Gaulle, qui voulait ainsi assurer l'indépendance énergétique et technologique de la France. Elle ne survivra cependant pas à l'ère d'industrialisation rapide du domaine nucléaire et sera abandonnée en 1969 au profit de la filière des réacteurs à eau légère pressurisée développée sous licence américaine Westinghouse.

### Réacteurs de deuxième génération

La deuxième génération de réacteurs se développe entre 1965 et 1990 et correspond à la majorité des réacteurs en exploitation dans le monde aujourd'hui. Cette génération déploie les filières des REP et des Réacteur à Eau Bouillante (REB), qui constituent ensemble 85 % du parc électro-nucléaire mondial actuel (voir partie 2). Dans une moindre mesure, elle comprend également des réacteurs à eau lourde, de la technologie canadienne *Canadian Deuterium Uranium* (CANDU), ainsi que des réacteurs avancés à gaz, les *Advanced Gas-Cooled Reactor* (AGR) britanniques.

À la suite du premier choc pétrolier en 1973, l'indépendance énergétique et la sécurité d'approvisionnement deviennent des priorités pour les pays industrialisés. Les politiques d'amélioration de l'efficacité énergétique (le fameux slogan « En France, on n'a pas de pétrole, mais on a des idées ») et de diversification des sources d'énergie se mettent en place. La France possède un potentiel hydraulique important mais n'a que peu de ressources fossiles : quelques gisements de pétrole ou de gaz ont été découverts dans les années 1950 (Parentis et Lacq), tandis que les mines de charbon s'épuisent. Pierre Messmer, premier ministre du président Georges Pompidou, décide donc d'accélérer considérablement le programme nucléaire français.

Entre 1971 et 1991 seront ainsi lancés 58 réacteurs à eau pressurisée, reposant sur la licence américaine de Westinghouse, et un réacteur à neutrons rapides

et caloporteur sodium dénommé Superphénix, prototype de taille industrielle arrêté en 1997.

La constitution du parc nucléaire français se fait en 4 étapes principales :

- présérie de puissance < 900 MWe,
- palier 900 MWe (types CP0, CP1 et CP2),
- palier 1 300 MWe (types P4 et P'4),
- palier 1 450 MWe (N4).

Avec près de 80 % de son électricité d'origine nucléaire, la France est à la fin de ce plan dans une situation unique au monde.

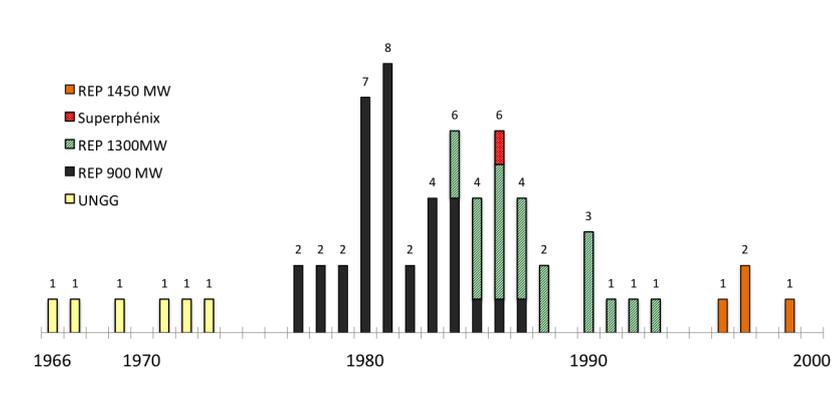


FIGURE 1.1 – Chronologie de la mise en service des différents réacteurs français.

### Réacteurs de troisième génération

Les premiers réacteurs de troisième génération sont aujourd'hui en construction. Il s'agit de l'*European Pressurized Water Reactor* (EPR) d'Areva en Finlande, en France ou en Chine, ou encore de l'AP1000 de Westinghouse en Chine. Ces réacteurs, qui vont progressivement remplacer les premiers réacteurs de génération II, ne comportent pas de révolution technique. Cette génération correspond davantage à une optimisation du concept des réacteurs de deuxième génération, avec la prise en compte de tous les retours d'expérience de plusieurs décennies d'utilisation. Les efforts se concentrent notamment sur l'amélioration des normes de sécurité et la réduction des risques économiques, afin d'assurer la compétitivité du nucléaire face aux autres moyens de production d'électricité.

### Réacteurs de quatrième génération

La quatrième génération de réacteurs nucléaires a pour objectif de permettre un développement à long terme de l'énergie nucléaire dans un contexte de contraintes environnementales fortes : il s'agit ainsi d'améliorer nettement les rendements thermodynamiques ou encore de développer des réacteurs rapides

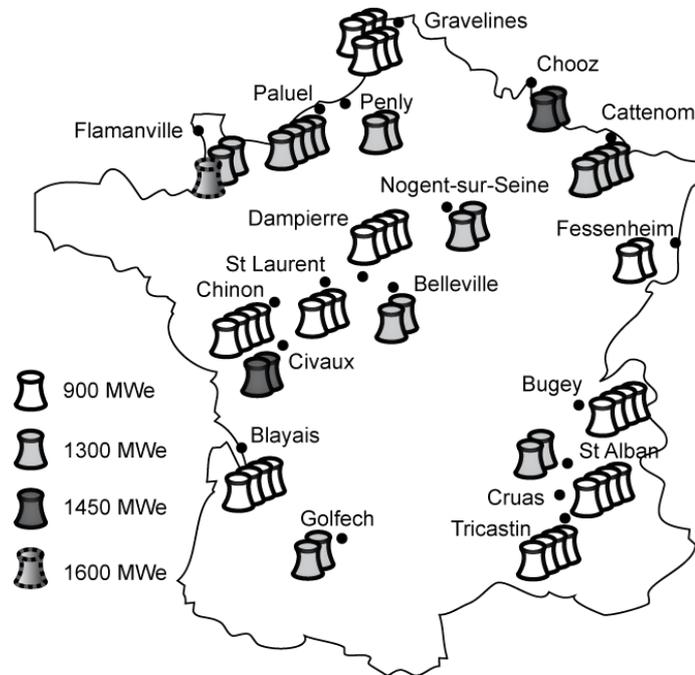


FIGURE 1.2 – Centrales nucléaires françaises en exploitation en 2010, réparties par site et par puissance palière.

permettant de fortement limiter la consommation d'uranium et la production de déchets radioactifs. Pour atteindre ces objectifs, des filières différentes devront être employées (comme le réacteur rapide au sodium envisagé par la France) et de profondes évolutions technologiques seront nécessaires (voir partie 3).

### 1.2.2 Le cycle combustible

De la même manière que pour les filières de réacteurs, les choix concernant le cycle du combustible et les investissements correspondants engagent sur le très long terme. La France a acquis une expérience précieuse dans ce domaine.

#### Minerai

En 1948, les chercheurs du CEA découvrent le premier gisement significatif d'uranium en France à La Crouzille (Nord du Limousin). C'est initialement le minerai riche, d'une teneur en uranium pouvant aller jusqu'à 20 %, qui est exploité. Rapidement, le minerai exploité ne contient plus qu'une petite fraction d'uranium naturel, soit une teneur de 0,1 à 1 %, mais cela permet néanmoins à la France, pendant une quarantaine d'années, d'extraire une partie importante