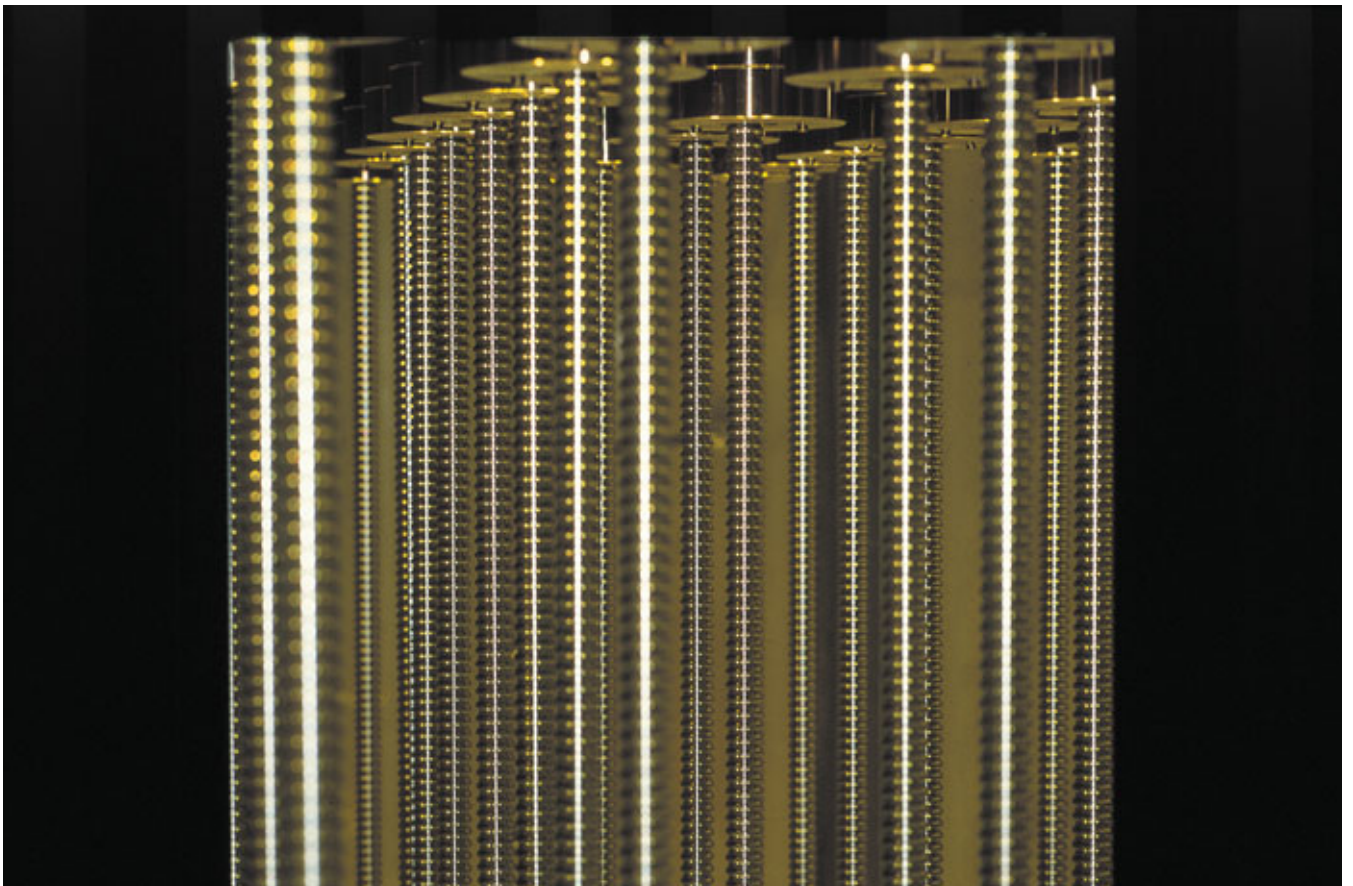


CONTRÔLE ET PILOTAGE DES RÉACTEURS À EAU SOUS PRESSION

Une réaction en chaîne s'entretient dans un réacteur nucléaire par la succession de fissions de noyaux qui libèrent à leur tour des neutrons. Mais comment contrôler et piloter cette réaction en chaîne ? Autrement dit, comment faire fonctionner un réacteur de façon à la fois souple et sûre ? Plusieurs moyens sont disponibles pour cela dans un réacteur à eau sous pression.



C. Pauquet/Framatome

Gros plan sur une partie des tiges de commande des grappes de contrôle d'un réacteur à eau sous pression.



Contrôler et piloter un réacteur nucléaire en général et un **réacteur** à eau sous pression (REP) en particulier (encadré E, **Les principaux éléments d'un REP**) implique d'être capable de le démarrer, de l'arrêter ou de modifier sa puissance pour répondre aux besoins de son exploitant. À tout instant, un réacteur stable est **critique** (voir *Les phénomènes neutroniques*) et ce, quel que soit son niveau de puissance. Si son **bilan**

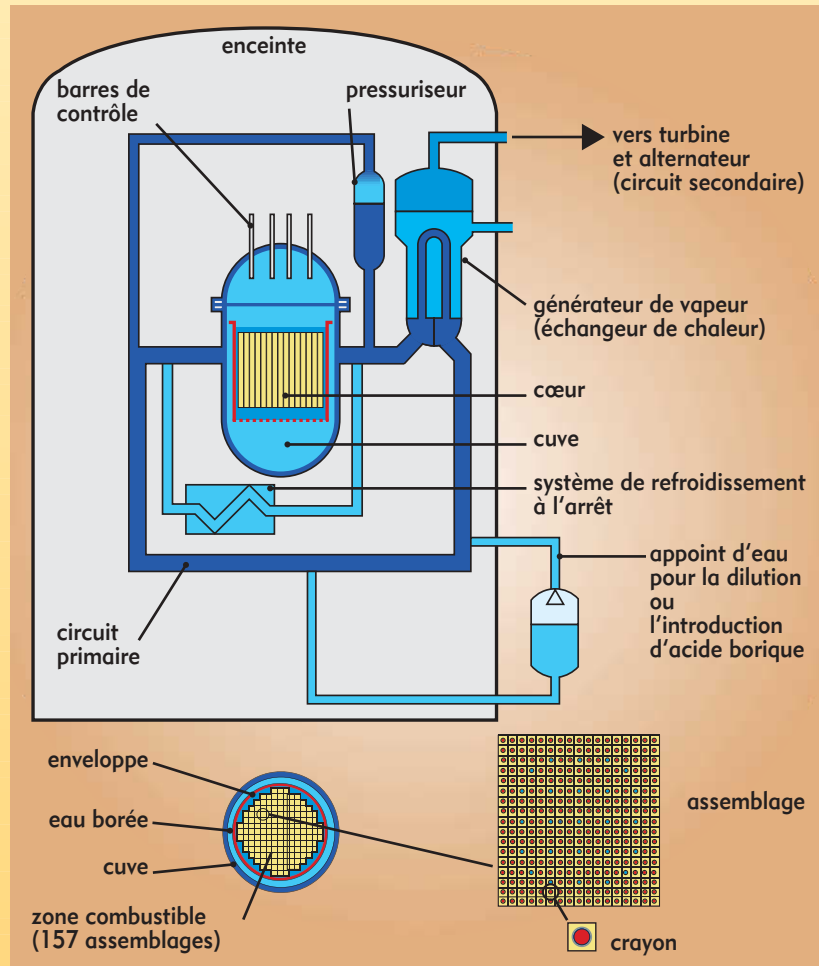
neutronique est modifié, par exemple en réduisant la population de **neutrons**, le réacteur devient **sous-critique** dans un premier temps, puis redevient critique en se stabilisant ensuite à un niveau de puissance inférieur à celui de la situation initiale. Tout l'art du contrôle et du pilotage consiste à réaliser ces opérations de manière fiable, sûre et économique. Comprendre comment s'effectue le contrôle du réacteur, c'est donc

Les principaux éléments d'un REP

E

Dans les réacteurs à eau sous pression (REP) du type de ceux exploités par EDF, la réaction en chaîne se déroule dans le **cœur**, haut d'environ 4 mètres, constitué d'**assemblages** de 264 **crayons** constitués chacun de pastilles de **combustible** (oxyde d'uranium enrichi ou mélange d'oxydes d'uranium et de plutonium) ; ces pastilles sont placées dans une gaine métallique. Il y a en tout dans un cœur environ quinze millions de ces pastilles. Les assemblages - au nombre de 157 à 205 suivant la puissance du réacteur - baignent dans de l'eau sous pression (155 bars) qui sert à la fois de **caloporteur** et de **modérateur** ralentissant les neutrons pour rendre plus efficace la réaction de fission. Cette eau circule dans le **circuit** (fermé) primaire du réacteur, dont l'élément central est la **cuve** où sa température passe d'environ 290 à 330 °C en circulant entre les crayons de combustible avant de céder sa chaleur à un **circuit secondaire** au niveau des **générateurs de vapeur**. Dans plusieurs dizaines d'assemblages (48 à 73) peuvent être insérés 24 crayons **barres de contrôle** en matériau absorbant les neutrons, regroupées en **grappes**, qui coulisent à la demande des opérateurs pour faire

varier la **réactivité** et donc la puissance du cœur. Ceux-ci peuvent par ailleurs introduire dans le circuit primaire de l'**acide borique** qui présente également la propriété d'absorber les neutrons.

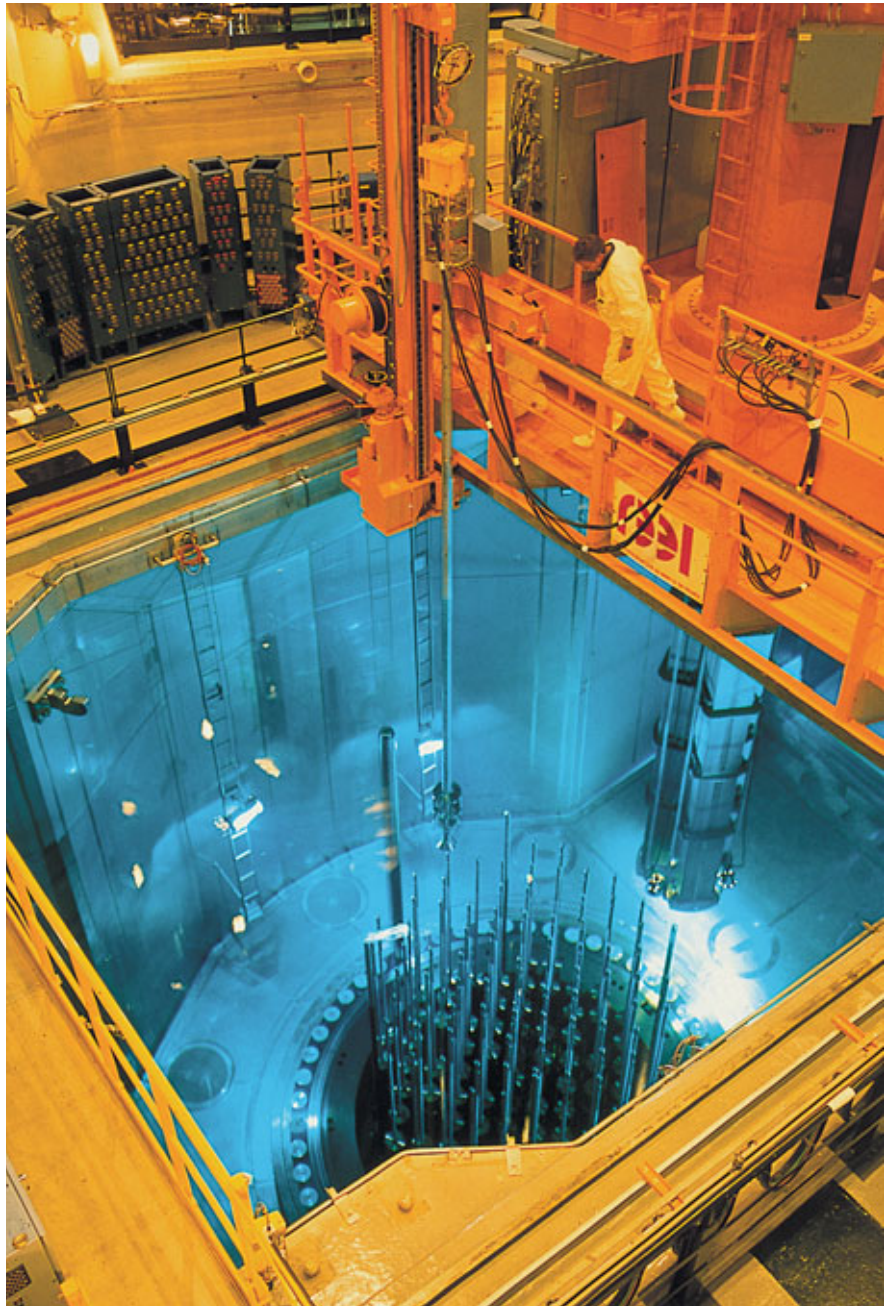


comprendre les phénomènes affectant la population neutronique qui surviennent en son sein.

Le chapitre I a montré que c'est la **fission** induite par les neutrons qui entretient la **réaction en chaîne**, et aussi que les réactions nucléaires qui ont lieu ne sont pas uniquement des réactions de fission. Un neutron peut également être **capturé** par un noyau, qui ne fissionne pas mais se transforme en un autre noyau aux propriétés physiques différentes. Il peut aussi sortir du cœur du réacteur, fuyant ainsi le milieu **fissile**, ou perdre une partie de son énergie par un choc sur un noyau, comme une boule de billard se ralentit par une succession de chocs contre d'autres boules (encadré B, **Les différents types d'interaction entre un neutron et un noyau**).

Un autre phénomène d'importance majeure est l'évolution du **combustible**. Une fois fixée la puissance demandée au réacteur, il faut disposer d'une certaine quantité de matière fissile pour que la réaction en chaîne s'entretienne. Or, le combustible s'use : il en disparaît en permanence une certaine quantité par fissions (en donnant des **produits de fission**, non fissiles mais parfois très absorbants de neutrons) ou par captures (et dans ce cas apparaissent soit des noyaux également très capturants, soit d'autres noyaux fissiles : c'est ainsi que l'uranium 238 non fissile donne naissance au plutonium 239 fissile en absorbant un neutron). C'est cette succession de phénomènes qu'on appelle **irradiation neutronique**. Un réacteur nucléaire n'est donc

Intervention sur les grappes de contrôle d'un réacteur de la centrale EDF de Civaux.



C. Pauquet/Framatome

pas une machine statique : sa composition se modifie constamment au cours du temps, du fait de cette irradiation et de la **radioactivité** de certains noyaux. Le combustible perd au fil du temps de son efficacité, de sa **réactivité** selon le terme employé par les physiciens des réacteurs.

Deux phénomènes à évaluer

Deux phénomènes doivent donc être évalués pour pouvoir définir les moyens de contrôle du réacteur : d'une part la décroissance au cours du temps de la réactivité, du fait de la consommation de matière fissile et de l'apparition de nouveaux noyaux, et d'autre part le besoin

permanent de contrôler cette réactivité. Il faut ainsi disposer de moyens de contrôle et de commande pour assurer à tout instant la sûreté (être capable d'arrêter la réaction nucléaire), le *pilotage* (pour fonctionner au niveau de puissance requis et suivre les **transitoires** nécessaires) et la *compensation* de la perte de réactivité dans le cœur, liée à l'évolution de la composition du combustible nucléaire.

Utiliser au mieux le combustible

Un premier aspect du contrôle concerne ce qui est communément appelé la "gestion" du cœur, visant à la meilleure

utilisation possible du combustible. Dans le cas des REP, du combustible neuf est introduit dans le réacteur à intervalles de temps réguliers et assez longs : 1 à 2 ans. Par exemple, il peut s'agir de *fractionnement par quart de cœur*, qui correspond à une coexistence dans le cœur, en début de cycle d'irradiation (laps de temps qui sépare deux chargements partiels du combustible) quatre types d'assemblages : neufs, ayant passé $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$ ou $\frac{3}{4}$ de la durée de vie complète au moment du rechargement. Au rechargement suivant, les assemblages auront passé $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$ ou $\frac{3}{4}$ ou la durée maximale possible. Les assemblages qui sont dans ce dernier cas seront retirés du cœur, placés dans une piscine de

L'effet Doppler : un stabilisateur automatique

1

Une augmentation locale de la température du combustible d'un réacteur nucléaire, donc une agitation thermique accrue des noyaux des atomes d'uranium 238 qui le constituent, a pour effet immédiat d'élargir les **sections efficaces** résonnantes de **capture** des **neutrons** d'une certaine énergie et donc de faire chuter la puissance neutronique dissipée localement. Davantage de neutrons sont donc capturés et moins nombreux sont ceux qui sont disponibles pour de nouvelles fissions. Cet effet Doppler est dû à la variation de la vitesse relative d'un neutron se déplaçant dans la matière par rapport aux noyaux qui ne sont pas immobiles, mais soumis à une agitation thermique. La vitesse relative du neutron est plus grande si, au

moment de l'impact, le noyau se dirige vers lui et est plus petite si le noyau se déplace dans le même sens. Ces petites différences de vitesse relative sont en général négligeables sauf si les sections efficaces varient très brutalement en fonction de ce paramètre, ce qui est justement le cas au voisinage des pics de résonance.

Des effets de variation de la réactivité d'un réacteur, l'effet Doppler est le plus rapide et le plus sensible. Il constitue un facteur auto-stabilisateur essentiel à la régulation du réacteur car il est spontané et d'autant plus puissant que la perturbation (variation de température) qui l'a créé est importante. C'est grâce à cet effet qu'un réacteur nucléaire ne peut, en aucun cas, devenir une bombe atomique.

stockage et remplacés par des assemblages neufs après réarrangement et repositionnement, ces dernières opérations ayant pour but principal "d'aplanir" la **nappe de puissance**, c'est-à-dire d'homogénéiser le plus possible la puissance générée par le cœur.

De "trop" à "juste assez"

L'exploitant doit disposer d'une réserve de réactivité suffisante pour que le cœur fonctionne avec une réaction en chaîne entretenue de façon continue pendant un cycle. Ceci suppose qu'il dispose de "trop" de réactivité au début du cycle, pour en avoir "juste assez" à la fin, avant l'arrêt pour extraire le combustible utilisé et en introduire du neuf. Cette réactivité supplémentaire initiale est contrôlée simplement, en introduisant dans le cœur un absorbant de neutrons dont la quantité sera réduite de façon régulière tout au long du cycle afin de compenser la disparition des noyaux de combustible. Dans les REP, cet absorbant est essentiellement du bore, sous forme d'acide borique, dilué dans l'eau qui sert à la fois à transférer la chaleur produite par les fissions et à ralentir les neutrons.

Pas d'élévation de puissance sans contre-réaction

Il apparaît donc que plus l'exploitant souhaite disposer de réacteurs ayant des cycles longs (ce qui est économiquement intéressant, les arrêts étant plus espacés), plus la réserve de réactivité doit être forte... et plus il doit y avoir d'absorbant destiné à la compenser. Toutefois, la quantité de bore dilué dans l'eau est limitée par un principe de sûreté fondamental, qui veut que toute élévation de puissance (donc de température) se traduise *toujours* par une "contre-réaction" abaissant cette puissance. Le **rapport de modération** est choisi pour que, dans toutes les configurations, la contre-réaction de l'eau soit négative, limitant ainsi la quantité de bore présente et, par conséquent, la durée du cycle d'irradiation (voir *Des situations maîtrisables par conception*).

En cas d'augmentation de puissance, donc d'échauffement, la densité de l'eau va diminuer, et elle ralentira moins les neutrons qui seront donc moins aisément cause de fission. De ce fait, la "contre-réaction" va bien s'opposer à la cause initiale⁽¹⁾. Au contraire, si l'eau contient

une grande quantité d'absorbant en solution, la réduction de densité conduit à la fois à une diminution des absorptions (donc à une augmentation de la réactivité) et à un moins bon ralentissement des neutrons. La perte d'absorptions peut devenir prépondérante par rapport à la réduction de ralentissement, ce qui limite la quantité d'absorbant soluble autorisée dans le réacteur⁽²⁾.

L'autre effet de contre-réaction lié à la température est celui provenant de l'échauffement du combustible. Lui aussi doit avoir pour conséquence une diminution de la réactivité. C'est "l'effet Doppler" (encadré 1), qui est toujours négatif dans les REP.

(1) Ceci s'exprime par "avoir un coefficient de température modérateur négatif" : un échauffement du modérateur a pour conséquence une diminution de la réactivité.

(2) Cette réduction de la réactivité qui suit une augmentation initiale de celle-ci a une autre conséquence : un refroidissement sera, au contraire, suivi d'une augmentation de réactivité. Ceci impose de dimensionner les moyens de contrôle et d'évacuation de puissance pour pouvoir faire face à un refroidissement intempestif.

Atelier gadolinium de FBFC à Dessel (Belgique) où sont préparées les poudres entrant dans la composition de "poisons consommables" pour combustibles REP.



E. Joly/Framatome

Différents types de poisons

La volonté de faire fonctionner les réacteurs selon des cycles plus longs a donc conduit à concevoir un mode de contrôle de la réserve de réactivité différent. Tout naturellement a germé l'idée d'introduire des poisons neutroniques solides, sous forme de crayons, exactement comme le combustible. Deux possibilités sont utilisées. La première est celle des poisons destinés au contrôle des premiers cœurs (au premier démarrage des réacteurs) et retirés aux cycles suivants : ils sont appelés "poisons consommables". La seconde est celle des crayons absorbants, qui font

intimement partie des assemblages et restent dans le cœur aussi longtemps que les assemblages dont ils font partie (entre 3 et 5 ans) mais qui sont presque intégralement consommés au cours du premier cycle. Pour le contrôle des premiers cœurs, l'absorbant solide le plus usité en France est le bore mélangé à du verre. De l'oxyde de gadolinium mélangé à de l'oxyde d'uranium est utilisé pour les autres cœurs.

Bien entendu, une optimisation très fine (quantité de poison, choix des emplacements...) est nécessaire. Il faut contrôler à bon escient la population neutronique et la réduire suffisamment, mais ne pas la gaspiller !

L'effet xénon : une perturbation temporaire

2

L'effet xénon s'explique par le fait que ce **produit de fission** est très fortement absorbant pour les **neutrons thermiques**, ceux qui provoquent la fission de l'uranium 235. Le xénon a donc une capacité élevée à modifier la **nappe de puissance** dans le cœur, c'est-à-dire sa répartition. Il apparaît essentiellement par suite de la décroissance radioactive d'un autre produit de fission, l'iode. Il disparaît à la fois par absorptions et par décroissance radioactive. Ainsi, un nouvel équilibre ne s'instaure pas instantanément si la situation d'équilibre entre création et disparition de xénon est, par exemple, modifiée suite à l'introduction d'une barre de contrôle.

Le haut du cœur, zone dans laquelle la population neutronique se trouve réduite par introduction de l'absorbant, voit dans un premier temps la quantité de xénon croître. Le flux étant plus faible à cet endroit, le xénon disparaît moins et la diminution de la quantité de cet élément par décroissance radioactive ne survient qu'avec un temps de retard. Cette augmentation de la quantité de xénon va provoquer une réduction supplémentaire de la population neutronique, et donc augmenter l'effet de la barre dans le haut du cœur. Comme la puissance moyenne demandée au cœur reste inchangée, la zone inférieure va voir sa puissance augmenter pour compenser.

par introduction d'éléments absorbants de neutrons : du carbure de bore ou un alliage d'argent, d'indium et de cadmium (AIC)... Ces éléments absorbants sont regroupés dans des **grappes de contrôle** qui s'introduisent dans les emplacements laissés libres à cet effet dans les assemblages (encadré E, **Les principaux éléments d'un REP**). Ces dispositifs d'anti-réactivité, insérés ou retirés du cœur selon les besoins, permettent de gérer la réserve de réactivité nécessaire au fonctionnement du réacteur à différents niveaux de puissance.

Sûreté et souplesse

Le contrôle du réacteur au moyen de ces grappes, hétérogène puisque certaines zones du cœur accueillent des absorbants et d'autres pas, fait apparaître un problème particulier, lié à l'évolution du combustible, causé par la présence de xénon (encadré 2). Le

Le pilotage : un contrôle rapide

Le contrôle destiné à assurer le pilotage (réduire ou augmenter la puissance, arrêter complètement le réacteur puis le

redémarrer) participe d'une autre philosophie. Il ne s'agit plus là de réaliser un contrôle "lent" destiné à compenser une évolution naturelle du combustible, mais de modifier rapidement le bilan neutronique dans le cœur. Ce résultat s'obtient

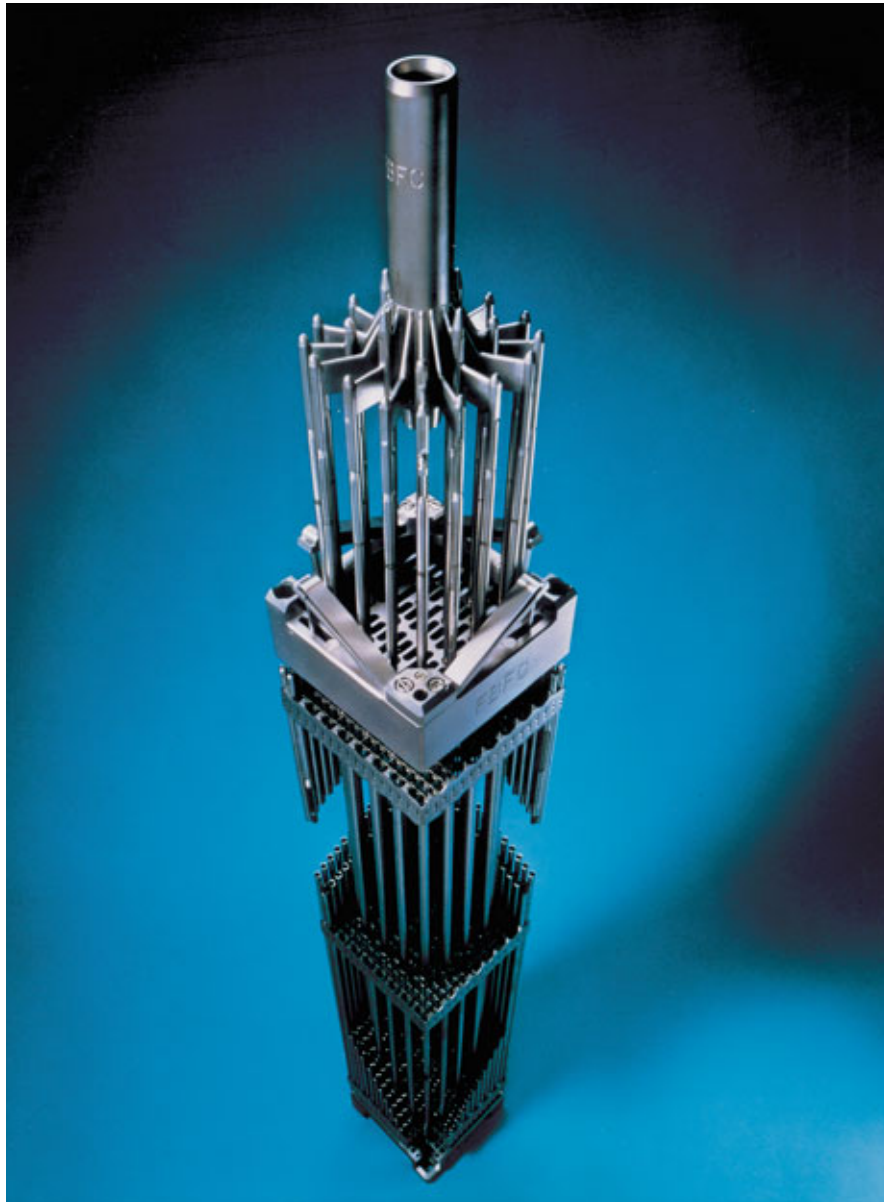


Salle de commande et poste d'observation d'un réacteur de la centrale EDF Chooz B.



Marc Morceau/Médiathèque EDF

Modèle d'un assemblage combustible de REP montrant en haut la tête de la grappe de commande et au milieu, parmi les crayons combustibles (ici en partie coupés ou absents) les tubes guides des barres de contrôle.



Framatome/FBFC

phénomène généré par ce produit de fission, qui se manifeste au bout de quelques heures après l'événement initial⁽³⁾, appelé "oscillation", augmente le déséquilibre entre le haut et le bas du cœur. Il va de soi que de telles oscillations vont à l'encontre d'un des principes de bases de la gestion des cœurs qui est de produire la puissance de la façon la plus homogène possible dans le cœur. Des procédures très précises pour le pilotage des réacteurs au moyen des grappes de contrôle ont donc été mises en place afin de respecter la règle

de minimisation du déséquilibre de puissance entre le haut et le bas du cœur.

La conception d'un réacteur nécessite ainsi de concilier, dans un souci de sûreté, de souplesse et d'économie, des principes parfois antagonistes : il a fallu faire preuve d'imagination pour faire cohabiter des moyens de contrôle permettant de répondre simultanément à ces diverses exigences !

Anne Nicolas

Direction de l'énergie nucléaire
CEA/Saclay

(3) Ces "quelques heures" sont liées aux valeurs des périodes de l'iode (6 heures) et du xénon (9 heures).

Pour en savoir plus
Deux ouvrages de PAUL REUSS dans la
Collection Que sais-je ? (PUF) :
L'énergie nucléaire et *La neutronique*.