

Le surgénérateur tel que le critiquent officiellement les Anglais

La Commission Royale sur la Pollution de l'Environnement a soumis au Parlement britannique, en septembre dernier, un rapport intitulé banalement: «L'énergie nucléaire et l'environnement». Il contient en particulier des faits inédits sur le surgénérateur. Discutés pourtant sans passion, ces faits vont rallumer à coup sûr le débat passionné qui oppose les tenants et les adversaires de ce type de centrale.

■ Dans la succession des étapes que suit le développement de l'énergie nucléaire, le surgénérateur représente un aboutissement logique : c'est en effet un réacteur qui permet d'une part de tirer un meilleur parti de l'uranium naturel, dont les réserves sont loin d'être illimitées, d'autre part de consommer le plutonium produit comme déchet par les centrales à neutrons lents. Aboutissement certes, mais aussi technologie toute différente posant donc des problèmes nouveaux.

En effet, les étapes gaz (filière française abandonnée en 1969 et filière dite « Magnox » anglaise, également abandonnée plus récemment) puis eau (filière triomphante américaine des PWR — eau pressurisée de Westinghouse — et BWR — eau bouillante de la General Electric), aboutissent à l'étape métal (sodium liquide) du surgénérateur. Mais le fluide intermédiaire entre la chaudière et la turbine n'est évidemment pas seul en cause : il y a aussi les neutrons émis dans la fission qui sont lents dans les piles actuelles, donc freinés par des modérateurs (graphite, eau légère, eau lourde) et qui sont rapides dans le surgénérateur. Ce dernier se rapproche donc de la bombe atomique et ce n'est pas nous qui le disons ; on trouve, en effet, dans le traité Physique des Réacteurs Nucléaires de Puissance, de l'ingénieur Barjon, édité par l'Institut National Supérieur des Techniques Nucléaires de Grenoble, en page 533 : « C'est ainsi que le

premier réacteur rapide surcritique au Plutonium 239 fonctionna le 16 juillet 1945 à Alamo-gordo, les deux autres étant les tristement célèbres « Little Boy » à Uranium 235, qui explosa à Hiroshima le 6 août, et « Fat Man » (second au Pu) qui explosa à Nagasaki le 9 août ». On ne saurait mieux dire.

La question posée par les surgénérateurs frise le cas de conscience. Elle a été exposée ici-même (voir Science et Vie n° 703, d'avril 1976 et n° 709 d'octobre 1976). Mais l'occasion nous est donnée d'y revenir à la suite de la publication à Londres du sixième rapport de la Royal Commission on Environmental Pollution, intitulé Nuclear Power and the Environment et soumis au Parlement britannique en septembre 1976. Ce document officiel porte en épigraphe une phrase de Hannès Alfvén, prix Nobel de Physique 1970 : « Si un problème est trop difficile à résoudre, nul n'a le droit d'affirmer qu'il a été résolu par les seuls efforts faits pour le résoudre ».

Cette citation laissera rêveur bien des lecteurs français familiers des méthodes employées par nos informateurs ès atome.

Nous avons extrait de ce rapport ce qui a trait aux surgénérateurs, préalablement introduits par un rappel des réalisations antérieures — celle des réacteurs dits thermiques — pour que le lecteur situe exactement l'ensemble de la question. Les numéros sont ceux des paragraphes du rapport.

100. C'est le contrôle strict de la réactivité qui est à la base de la sécurité d'un réacteur. Toute défaillance dans ce contrôle risque d'entraîner une élévation très rapide de la réactivité et, par contre-coup, de la température du combustible, le faisant fondre et s'écouler à la base du réacteur.

Il est important de noter que dans un réacteur thermique, le combustible tel qu'il est disposé est très proche du maximum de réactivité : dans ces conditions, la fonte du cœur a fort peu de chance de provoquer une configuration critique. En revanche, le combustible fondu peut s'écouler à travers la protection, d'autant plus que — dans certains types de réacteurs du moins — cette protection peut se trouver préalablement fissurée par la force explosive de l'interaction thermique ou chimique entre le combustible et le fluide réfrigérant. Une fuite des produits de fission volatils s'ensuivrait, principalement l'iode.

Cette description très sobre de « l'excursion prompte critique » est évidemment valable pour les réacteurs classiques, nous verrons ensuite ce qu'il en est pour les surgénérateurs. Le rapport anglais précise ensuite :

101. Dans un certain type de réacteur, la fonte du cœur peut résulter de l'empêchement de l'évacuation de la chaleur résiduelle produite par le combustible, le réacteur étant pourtant arrêté. En effet, cette chaleur est dégagée par la seule radioactivité des produits de fission accumulés dans les barres de combustible : elle représente 6% de la chaleur emportée par le réfrigérant quand le réacteur fonctionne à pleine puissance, mais elle tombe à 1% une heure après son arrêt total, car elle est surtout produite par des isotopes à vie très courte. Il en résulte que si un accident entraîne une perte de réfrigérant, il ne suffirait pas d'arrêter le réacteur, une circulation annexe d'un réfrigérant de secours devrait se mettre aussitôt en route pour évacuer cette chaleur excédentaire produite après l'arrêt du réacteur. Dans le cas des réacteurs à eau légère, l'absence d'un tel dispositif a fait l'objet de controverses.

C'est dire, de manière délicate, mais le dire tout de même, que l'actuelle filière américaine à eau, maintenant adoptée par la plupart des pays : Grande-Bretagne, France, Allemagne et les nombreux sous-traitants, est entachée d'un grave défaut de sécurité.

Après avoir étudié les filières différentes réalisées, avec leurs mérites et leurs défauts respectifs (la filière graphite-gaz, dont le Magnox anglais, puis le réacteur à gaz, dit avancé, puis le haute-température, le plus intéressant et le plus sûr, mais abandonné⁽¹⁾ pour des raisons obscures et sans doute une pression internationale et des difficultés technologiques) le rapport aborde les surgénérateurs dits Liquid Metal Cooled Fast Breeder Reactors (Réacteurs surgénérateurs à neutrons rapides et à refroidissement par métal liquide).

112. Le tout premier réacteur nucléaire à produire de l'électricité aux U.S.A. (en petite quantité, il est vrai) a été de ce type. Et le réacteur britannique de

Dounreay, à neutrons rapides également, a atteint la criticalité près de deux ans avant la mise en service de la première station Magnox. Mais deux accidents graves aboutissant à la fonte partielle du combustible dans les réacteurs U.S. de ce type ont obligé ce pays à différer son programme dans cette voie : la construction du prototype de 350 MW à Clinch River, ne commencera pas avant fin 1977 au moins. Aussi l'effort principal dans cette voie reste-t-il le fait des pays européens qui ont des gisements d'uranium peu abondants et qui doivent, de ce fait, utiliser leurs ressources plus économiquement que les Etats-Unis.

Ce rappel historique est intéressant pour situer exactement le problème des réacteurs à

LES AUTEURS DU RAPPORT BRITANNIQUE

■ C'est un spécialiste de la physique théorique, sir Brian Flowers qui a signé le rapport de la Commission Royale britannique sur la pollution de l'Environnement, au terme d'une enquête de deux ans. Sir Brian Flowers, 52 ans, a longuement enseigné la physique au Massachusetts Institute of Technology aux Etats-Unis. Il est actuellement recteur de l'Imperial College of Science and Technology de Londres. Pour effectuer l'enquête, il a été assisté de 17 personnes recrutées dans les milieux les plus divers : on y trouve un professeur de géographie, un directeur d'Unilever, le secrétaire général de l'Union des Télécommunications, un professeur en médecine, un professeur de biologie des rayonnements, etc. Selon la législation britannique, une Commission Royale a les pleins pouvoirs pour interviewer qui que ce soit et pénétrer où que ce soit sur le territoire national. En particulier, l'administration ne peut pas se soustraire à ses investigations et est obligée de fournir à la commission d'enquête toutes les informations qu'elle désire.

Dans le cas présent, il ne semble pas que l'ATOMIC ENERGY AUTHORITY se soit dérobée à ses obligations, malgré le fait que la commission ne lui ait pas été favorable. Le problème du surgénérateur dont nous passons les extraits ci-contre, ne constitue qu'un des éléments de l'enquête plus vaste sur le bien fondé du programme nucléaire britannique.

L'esprit du rapport peut se résumer à la déclaration faite par Sir Brian Flowers à l'Herald Tribune : « Je ne suis pas contre le programme nucléaire ; je n'ai pas dit qu'il faille l'arrêter. J'ai simplement dit que certaines choses qui auraient du être faites, n'ont pas été faites... Demandons-nous si c'est bien la direction qu'il faut prendre. Arrêtons-nous et réfléchissons avant de franchir un nouveau pas important ».

neutrons rapides, dont le surgénérateur est la forme la plus évoluée. Il est parfaitement exact que ce type de réacteur a été préconisé dès l'origine de l'énergie nucléaire, avant toute autre filière, mais les déboires initiaux ont fait abandonner momentanément, puis différer jusqu'à maintenant son utilisation à grande échelle. Précisons ici que les prototypes en marche en Europe sont, en France, Phénix depuis 1972, de

(1) Sauf en Allemagne de l'Ouest où un réacteur de 300 MW doit entrer en fonctionnement en 1978.

230 MW, qui connaît une panne depuis juillet dernier par suite d'une fuite du métal réfrigérant, le sodium liquide, entre le premier circuit échangeur et le second. Et en URSS, sur les bords de la mer Caspienne, à Chevtchenko, le BN 350 (Bystrii Neutron, pour Neutron Rapide de 350 MW) qui a connu il y a deux ans une grosse panne due à une fuite de sodium qui s'est enflammé au contact de l'air, provoquant un grave incendie. Le rapport continue.

113. Le combustible au centre du cœur est un mélange d'oxyde d'uranium et de plutonium où le plutonium entre dans la proportion d'un cinquième, soit 5 tonnes de Pu dans le futur CFR. Ce cœur assure la majeure part de la réactivité. Tout autour de ce « mélange d'oxyde » central, on dispose un manchon d'uranium appauvri — c'est-à-dire de l'uranium dont on a enlevé l'uranium 235 fissile. Cet uranium 238 presque pur absorbe les neutrons et se trouve transmuté en Pu 239 ; il agit également comme réflecteur de neutrons.

Ce manchon est retiré périodiquement et le plutonium synthétisé est extrait de l'uranium par retraitement. Ainsi, comme son nom l'indique, ce type de réacteur « surgénère » davantage de plutonium (peut-être 10 à 20 %) qu'il n'en consomme pour entretenir les fissions. Une fois le réacteur construit et alimenté avec sa charge initiale de plutonium (avec une marge supplémentaire de 35 % pour assurer l'ensemble des cycles du combustible), il n'y a plus besoin d'aucun apport ultérieur d'U 235, ni de plutonium, et le réacteur marchera indéfiniment à partir de l'uranium appauvri qu'on y mettra autour, sorti des autres réacteurs thermiques classiques.

De plus, il synthétisera les quantités de plutonium nécessaires aux autres surgénérateurs. Toutefois, pour obtenir le plutonium initial à raison de 4 t par Gigawatts (Giga = milliard) d'électricité produite, il faudra disposer d'un réacteur thermique de même puissance qui fonctionne des années pour le produire : 7 ans pour un Magnox, 30 ans pour un réacteur à gaz du type avancé. Aussi le surgénérateur assurera-t-il l'indépendance vis-à-vis d'un difficile approvisionnement en uranium, mais seulement à long terme car, à court terme, il exigera au contraire un vaste programme de réacteurs thermiques et, de ce fait, une grosse demande en uranium métal.

Voilà qui éclaire d'un jour nouveau la tendance actuelle et la politique d'équipement en centrales thermiques du type américain, dont on affirme — est-ce un hasard ? — qu'elles brûlent justement très vite leur uranium 235 selon la marche qu'on leur impose ; cette politique donc trouverait là une explication inavouée. Ce n'est qu'une hypothèse, peut-être, mais intéressante à creuser.

114. Nous avons déjà noté que le cœur d'un réacteur doit être très compact, très résistant et très conducteur en matière de calories. La densité de puissance du PFR (comparable à celle qu'aura sans doute le CFR) est de l'ordre de 390 kW par litre, à comparer aux 11 kW/l du cœur du réacteur eau lourde bouillante et le seul 1 kW/l dans le réacteur type Magnox (pour comparaison disons que la densité de puissance est de 0,8 kW/l dans une chaudière domestique de chauffage central à charbon).

Il en résulte qu'il est très difficile de trouver un fluide adéquat, gaz ou eau, pour évacuer cette énorme densité d'énergie sous forme de chaleur produite ; aussi les réacteurs à neutrons rapides utilisent-ils une circulation de métal liquide. La conductivité élevée de ce métal (conductivité thermique s'entend) — du sodium liquide en l'occurrence — et le fait qu'il n'est pas besoin de le soumettre à une pression représentent des avantages indéniables.

Il en est d'autres, par exemple le fait qu'après un arrêt du réacteur, la seule convection suffit à évacuer les calories excédentaires sans avoir à entretenir la circulation forcée par pompage du réfrigérant. En revanche, l'usage du sodium entraîne d'autres conséquences, défavorables cette fois, que nous examinerons dans le chapitre 6 (paragraphes 300, 301, 302 ci-dessous). L'une d'elles est que le sodium réagit chimiquement très violemment avec l'eau, par simple contact.

Une autre vient de ce que les échangeurs sont à forte pression pour le circuit de vapeur d'un côté, alors que le sodium circule à basse pression de l'autre côté. Toute fuite, même légère peut donc entraîner une réaction très violente et des conséquences dangereuses pour le cœur. Aussi doit-on passer par une seconde circulation de sodium liquide qui prend ses calories au premier circuit direct de sodium passant par le cœur et il les transfère au troisième circuit d'eau vaporisée, lequel, seul, passe par les turbines. Ce sont de telles fuites qui sont effectivement survenues dans les circuits d'échange calorifique au PFR de Douvreay et ont différé la marche à pleine puissance de près de deux années.

Ainsi se précise le genre de pannes dont les surgénérateurs sont affligés. Les graves accidents américains sont venus d'un défaut dans les circuits réfrigérants, il y a vingt ans ; quant aux surgénérateurs prototypes anglais, soviétiques et français, ils ont tous trois connu des pannes dans l'un des trois circuits sodium primaire — sodium secondaire — vapeur, entraînant chaque fois des arrêts de plusieurs mois à deux ans. Il est important de noter que ce n'est pas la partie nucléaire pourtant si délicate à maîtriser qui crée des ennuis, mais bien la partie mécano-chimique de circulation d'un fluide particulier inhabituel : difficultés donc d'ingénierie.

Mais voyons ce que dit maintenant le rapport anglais sur la partie nucléaire, précisément.

115. Tout comme le réacteur thermique, le réacteur à neutrons rapides n'est possible qu'à cause d'une particularité de la nature : l'existence des neutrons différés (neutrons émis par des radio-isotopes quelques secondes après la fission du noyau d'uranium). Si la réactivité se trouve encore augmentée notablement et très rapidement, les mécanismes de contrôle de la réactivité risquent d'être dépassés : il existe alors une probabilité théorique de formation accidentelle d'un sous-ensemble critique aux seuls neutrons rapides et prompts, c'est-à-dire non différés.

C'est, sur le plan technique, le principe même d'une explosion nucléaire, bien que le processus de la réaction en chaîne soit nettement plus lent que dans le cas provoqué de la bombe atomique et, de ce fait, l'énergie libérée en serait d'autant moindre. On ne sait pas encore très exactement si

une explosion de ce type aboutirait à la vaporisation du combustible ; on suppose en général qu'il pourrait l'être et les plans des réacteurs sont faits en prévision de cette éventualité extrême. Si cette sécurité s'avérait insuffisante, non seulement l'iode et le césium seraient libérés, mais également des quantités substantielles de produit de fission non volatils, tels le strontium, ainsi que du plutonium. Au cas où le réacteur serait construit dans un endroit habité les pertes en vies humaines seraient très grandes.

La raison pour laquelle cela peut se produire dans un réacteur rapide et non dans un réacteur thermique vient de ce que le premier a son combustible dans un état initial de réactivité en dessous du maximum de réactivité. Si tout le combustible d'un réacteur thermique se trouvait fondu en une seule masse, sa réactivité tomberait car il n'y aurait pas de modérateur (qui freine les neutrons) pour accroître la réactivité. Par contre, dans le cas de surgénérateur, tout le combustible fondu en une masse compacte la verra dans un état de réactivité maximum.

116. Les deux fusions du cœur dans les FBR américains ont été heureusement contenues et il n'y a pas eu libération de radioactivité à l'extérieur. Mais une fusion non contenue aurait des conséquences tellement catastrophiques (voir le paragraphe 303) que l'opinion prévaut selon laquelle les réacteurs rapides ne pourront jamais apporter une contribution majeure à un programme de puissance, du moins pas avant que les processus sous-jacents aux modifications de géométrie du cœur soient parfaitement compris. Les recherches dans ce champ d'idées sont activement menées sans qu'on sache encore maintenant s'il sera jamais possible de dessiner un jour un réacteur de ce type qui élimine complètement la possibilité d'un saut local d'énergie capable de rompre les projections les plus fortes soient-elles.

Cet aveu d'incertitude sur des effets majeurs et les termes mêmes d'un rapport officiel, soumis, rappelons-le, au Parlement britannique,

présent très lourd. Le paragraphe suivant, plus général, traite du cas particulier au plutonium et mérite d'être cité.

117. Les surgénérateurs dépendent du plutonium en tant que combustible primaire. Ce qui pose un certain nombre de problèmes spécifiques que nous examinerons plus en détail dans ce rapport. En particulier sa radio-toxicité (paragraphe 66-77) et les précautions à prendre pour sa manipulation. De plus, ce risque peut amener à l'utiliser dans des buts nuisibles, ce qui oblige à en surveiller très strictement l'utilisation qui en sera faite. On doit également noter que le plutonium est un élément essentiellement synthétique dont la production est uniquement tributaire d'installations de retraitement. Qu'une installation de retraitement vienne à se trouver hors d'usage pour un temps assez long, par exemple, à la suite d'un accident provoquant une contamination majeure, et un très sérieux problème d'approvisionnement se posera, à moins qu'il n'existe un large stock de plutonium ou qu'on puisse le trouver ailleurs.

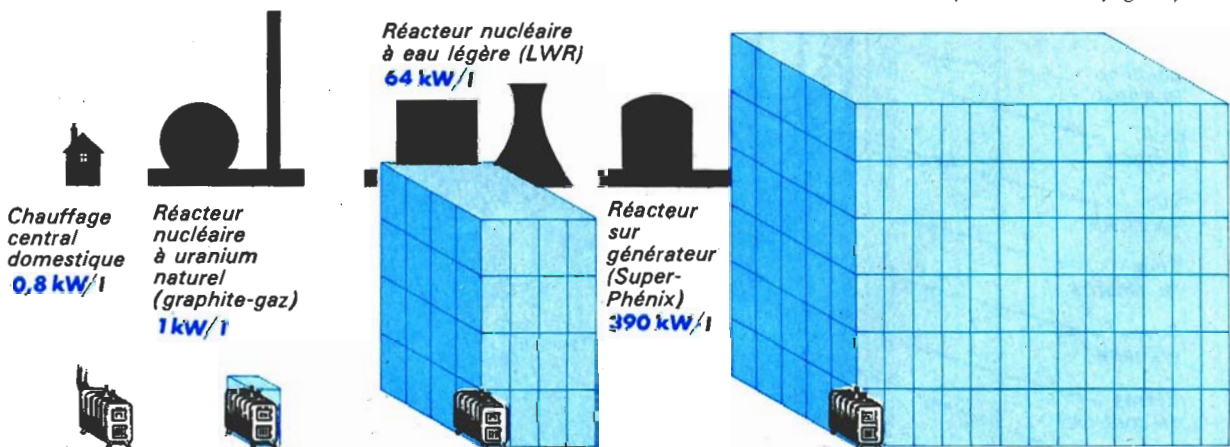
Dans le chapitre 6, le Rapport traite plus en profondeur les points abordés précédemment. En voici les paragraphes titrés « La sécurité des réacteurs à neutrons rapides ».

297. Dans les paragraphes 100, 101 et 115, nous avons décrit brièvement les différences qui existent entre les réacteurs thermiques d'une part, et les réacteurs à neutrons rapides d'autre part, quant à leur principe de fonctionnement ainsi que leur sécurité relative. L'importance des FBR (Fast Breeder Reactor, pour réacteur surgénérateur à neutrons rapides) dans le développement actuel et futur du développement nucléaire nous amène à conclure ce chapitre avec quelques développements relatifs à l'aspect sécurité.

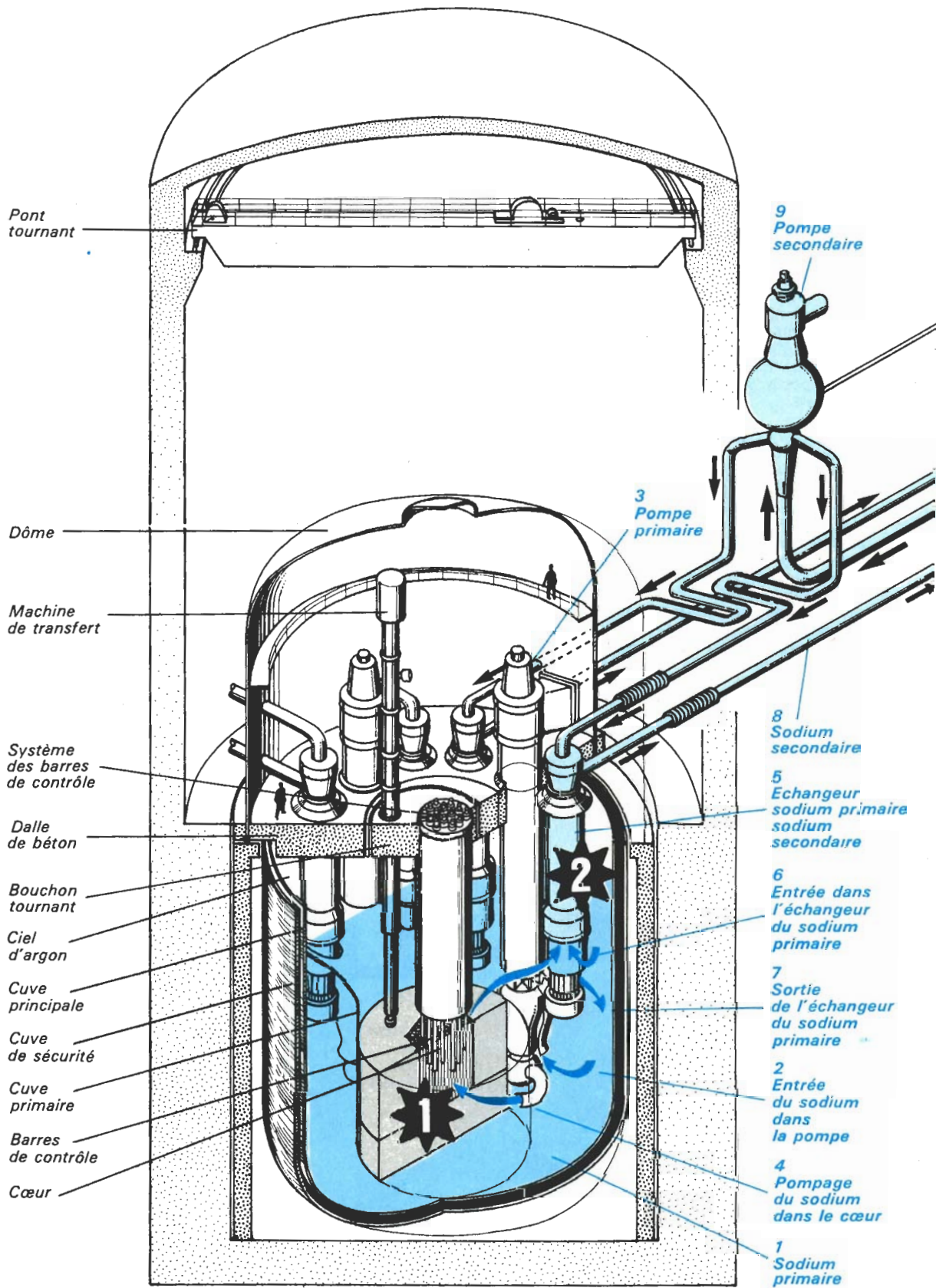
298. Pour tout réacteur, de quelque type qu'il soit, la sécurité repose avant tout sur le degré de confiance qu'on peut avoir dans trois secteurs :

- les systèmes de contrôle comme par exemple celui de l'arrêt instantané du réacteur ;

(Suite du texte page 73)



Super-Phénix : près de 400 kW par dm³. — Qu'est-ce qu'une densité de puissance ? C'est la puissance fournie par unité de volume dans la partie utile d'une centrale que ce soit le foyer de votre chaudière de chauffage central ou le cœur d'un réacteur nucléaire. Dans un réacteur du type graphite-gaz, cette densité de puissance est à peine supérieure à celle d'une chaudière de chauffage domestique (1 kW/l contre 0,8 kW/l). En revanche, dans le cœur du surgénérateur Super-Phénix elle sera près de 500 fois supérieure.



● les sécurités de secours automatisées, tel le système de refroidissement du cœur à mettre en route en cas d'arrêt de la circulation du réfrigérant ;

● les résistances structurelles.

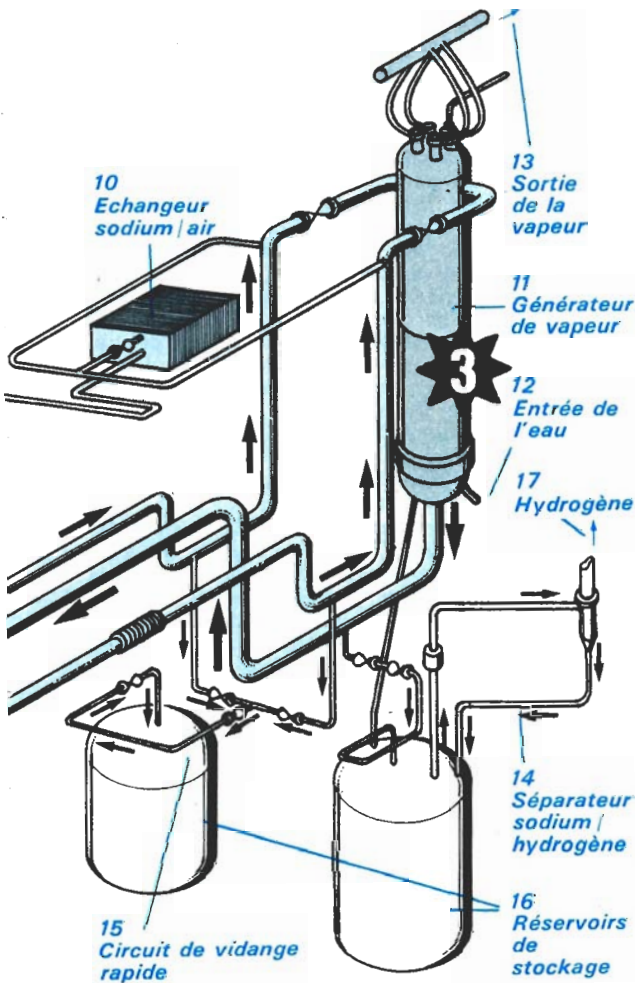
Dans chacun de ces secteurs le FBR refroidi par métal liquide possède ses avantages et ses inconvénients par rapport aux réacteurs thermiques.

299. Sur les réacteurs thermiques, les problèmes les plus difficiles en matière de sécurité se trouvent posés par les réfrigérants sous pression. Un réacteur à eau légère, par exemple, fait circuler de l'eau à très haute pression et à plusieurs centaines de degrés. Une dépressurisation soudaine libérerait de très grandes quantités d'énergie — dont il serait bien difficile de prédire les effets — et il n'y aurait plus de réfrigération autour des barres de combustible parce que l'eau s'y transformerait aussitôt en vapeur.

De ce fait il faudrait que les réacteurs à refroidissement par eau possèdent un système secondaire de refroidissement de secours. Il est difficile de dire quelle serait l'efficacité réelle d'un tel dispositif car, si les barres d'uranium se trouvent tordues par la chaleur, entre autres cas possibles, la circulation du liquide réfrigérant de secours serait bien compromise. Jusqu'à ces derniers temps l'efficacité supposée d'un système annexe n'a fait l'objet que de calculs par ordinateurs et des expériences à échelle véritable sont en cours dans l'Idaho.

300. Le FBR possède l'avantage que son réfrigérant sodium-liquide n'est pas pressurisé et qu'il a de surcroît une capacité calorifique élevée. Alors que, dans les réacteurs thermiques classiques, le réfrigérant doit être entretenu dans un mouvement cyclique par pompage, dans le FBR, même si les pompes tombent en panne, la convection naturelle du sodium suffit à enlever une très grosse quantité de calories et laisse ainsi environ une heure avant d'avoir à mettre en route un refroidissement auxiliaire : ce que l'on peut faire à partir de l'un des systèmes prévus dans la conception même de réacteur. Mais, d'un autre côté, le sodium pose des problèmes quant à sa manipulation en très grandes quantités, car il est éminemment inflammable. L'expérience acquise prouve que ces difficultés doivent pouvoir être matées et on a déjà réussi à éteindre des incendies importants à base de sodium. Il est à remarquer à ce propos que l'eau ne peut être utilisée pour éteindre un incendie qui se déclarerait dans ce type de réacteur, précisément à cause de la présence de sodium : c'est avec l'eau qu'on avait pu éteindre le réacteur de Windscale en feu, en 1957.

301. Le dispositif de refroidissement à basse pression du surgénérateur évite toutes les difficultés de récipients capables de supporter les fortes pressions comme c'est le défaut des réacteurs thermiques. Dans le réacteur à eau sous pression, par exemple, cela implique une cuve d'acier aux parois très épaisses qui est à la limite des possibilités techniques de la soudure, par ses dimensions et son épaisseur : la sécurité devient ainsi sujette à une appréciation basée sur des recherches beaucoup plus que sur la simple expérience accumulée. Il est difficile de déceler les microfissures dans de telles épaisseurs et encore plus au moment des réparations qui ne peuvent plus être faites qu'in situ. Des structures en béton précon-



UN SURGÉNÉRATEUR ET SES TROIS POINTS FAIBLES

Un surgénérateur comprend essentiellement un cœur dans lequel la fission dégage l'énergie sous forme de chaleur et un fluide qui permet de transmettre cette chaleur à un générateur de vapeur qui alimente les turbines entraînant les alternateurs. Les éventuels accidents sont donc de deux types : les premiers sont liés à la nature du cœur, les seconds à celle du fluide caloporteur. Voici les 3 points faibles d'un surgénérateur (ici le projet Super-Phénix de 1 200 MW) :

1) Le cœur : contrairement aux centrales à neutrons lents, les neutrons ne sont pas ralentis par un modérateur. C'est l'existence de neutrons rapides qui permet à la réaction en chaîne accidentellement surcritique-prompente de devenir « excursion » nucléaire, c'est-à-dire de prendre un caractère explosif.

2) L'échangeur sodium primaire / sodium secondaire. C'est ici que le sodium primaire qui circule dans le cœur, donc fortement radioactif, cède sa chaleur au sodium secondaire. C'est à ce niveau qu'est apparue une fuite dans le surgénérateur Phénix.

3) L'échangeur sodium secondaire-eau. Ici le sodium secondaire cède sa chaleur à l'eau qui doit produire la vapeur. Toute fuite aurait de graves conséquences puisque le sodium explose spontanément au contact de l'eau. □

trait renforcé pour les cuves des réacteurs les plus récents, comme l'AGR (Advanced Gas Reactor) et les derniers Magnox, sont moins susceptibles de donner lieu à défauts catastrophiques bien qu'on ait encore à redouter les fuites, par les armatures métalliques, ainsi que les effets des différences thermiques et du vieillissement par les neutrons sur le béton.

302. Dans tout réacteur employant un réfrigérant liquide, une quantité importante du combustible accidentellement fondue risque de réagir de manière explosive avec le réfrigérant, le transformant en vapeur. C'est un phénomène qui se produit de temps à autre dans les aciéries, quand une coulée de fonte est envoyée dans un creuset ou dans un moule contenant des traces d'humidité : la vaporisation instantanée de l'eau provoque une explosion aux effets fréquemment ravageurs. Dans le cas d'un réacteur à neutrons rapides du type surgénérateur, le transfert d'énergie serait toutefois gêné par la conductivité, relativement basse, de l'oxyde d'uranium et du plutonium fondu et la quantité environnante de sodium entourant le cœur en fusion. En outre, un réacteur qui aurait déjà fonctionné quelque temps contiendrait des quantités appréciables de produits de fission gazeux (surtout du krypton et du xénon) qui auraient tendance à former une couverture empêchant un contact très étroit entre le combustible et le sodium. Néanmoins il existe une possibilité, réelle et très grave, pour le FBR de voir la géométrie du cœur se trouver modifiée au point de réaliser, après explosion chimique, une masse critique vis-à-vis des neutrons rapides. L'augmentation brutale de réactivité ne serait un peu freinée que par la dispersion sous l'effet du souffle de l'explosion nucléaire qui s'en suivrait : le cœur se démantèlerait après vaporisation, en se dispersant, ce qui arrêterait la réaction en chaîne. Une telle chose est impossible dans les réacteurs à gaz Magnox et dans l'AGR (Advanced Gas Reactor), mais elle pourrait éventuellement arriver dans les réacteurs à eau (2).

Dans ces derniers, l'augmentation rapide de la réactivité peut provenir de la sortie très rapide d'une barre de contrôle : ce qui peut arriver si cette barre est soufflée vers l'extérieur par une cause physique adéquate. Mais une telle éventualité a été prévue et se trouve empêchée par construction même. On voit ainsi que le FBR n'est pas seul en cause dans cette possibilité d'une excursion nucléaire (3) mais sa probabilité est plus grande pour le surgénérateur qui comporte un plus grand éventail de circonstances pouvant la provoquer.

303. Nous avons discuté au début de ce chapitre des effets d'une dispersion importante de produits de fission gazeux et volatils dans un accident survenant à un réacteur thermique. Il y a pratiquement autant de produits de fission dans un surgénérateur de même puissance ; en revanche son cœur

contient plusieurs fois plus de plutonium et une quantité importante de transuraniens : américium et curium. Si le combustible venait à être fondu et mélangé au sodium, la plupart des produits de fission seraient retenus par le sodium avec qui ils entreraient en réaction chimique. Si, donc, du sodium enflammé s'échappait du réacteur, ces vapeurs contiendraient des produits de fission.

On estime généralement que dans un tel accident, les produits de fission seraient retenus par les puissantes superstructures dans lesquelles ces réacteurs sont logés (4). Néanmoins, la possibilité d'une importante vaporisation du combustible avec sa dispersion, même partielle, dans l'atmosphère doit l'emporter sur toute autre considération. Un tel processus permettrait la mise en liberté dans la nature non seulement des produits de fission gazeux et volatils, mais également ceux qui ne sont pas volatils. Il a été calculé que la libération de 10% d'un surgénérateur de puissance aurait des conséquences de dix à cent fois pires que celles que nous avons décrites dans le cas d'un réacteur thermique.

L'effet le plus important serait dû à l'inhalation des produits de fission non volatils, aboutissant à un développement des cancers du poumon dans la population qui se serait trouvée dans la zone balayée par le vent au moment de l'accident ; quant au sol de cette même région très étendue, il serait pollué par le plutonium et le césium.

304. Les conséquences d'un tel accident sont si graves que le surgénérateur peut difficilement être considéré comme une future éventualité commerciale majeure, du moins tant qu'on n'aura pas établi avec certitude et confiance qu'il est possible d'éviter les accidents de réactivité menant à la vaporisation du combustible. L'opinion prévaut actuellement qu'en l'espace de cinq années à partir de cette date, le programme de recherches en cours apportera des progrès substantiels dans cette voie. Les travaux dans ce sens sont menés par plusieurs pays qui en reconnaissant l'importance capitale, dans le cas où les surgénérateurs seraient adoptés sur une grande échelle. Une importante source de renseignements vient des réacteurs prototypes opérationnels comme celui de Dounreay (PFR).

Le comportement du combustible soumis à l'irradiation intense et exposé à des conditions de sécurité simulées y est étudié, bien que ce traitement gêne bien souvent la nécessité que l'on a aussi de connaître l'appareil dans sa marche régulière de régime normal. En particulier, on s'applique à déceler le plus vite possible les éventualités d'ébullition locale du sodium, en détectant les bruits provoqués dans les structures par ces points surchauffés. Il y a, en plus, d'autres considérations techniques qui ne peuvent être connues que par l'observation du réacteur lui-même et c'est pourquoi le projet d'un surgénérateur commercial (5)

(2) Pour ces réacteurs à eau, qui sont des réacteurs à neutrons lents, le phénomène n'est pas véritablement explosif.

(3) Pour les réacteurs à eau, comme pour tous les réacteurs à neutrons, on utilise habituellement l'expression « excursion prompte critique », réservant aux surgénérateurs l'expression « excursion nucléaire » qui est une excursion prompte critique à neutrons rapides.

(4) Signalons que l'enceinte de confinement primaire prévue pour le projet britannique CFR est environ dix fois plus épaisse que l'enceinte de confinement primaire de Super-Phénix.

(5) La commission recommande par ailleurs que ce projet soit réalisé dans une région située « loin de toute agglomération » (voir S. & V. n° 703), c'est-à-dire en clair, dans l'extrême nord de l'Ecosse là où se trouvaient déjà les prototypes DFR et PFR. Rappelons que Super-Phénix est prévu à 44 km de Lyon.

représente une étape importante pour répondre un jour à la question de savoir si le niveau de sécurité indispensable pourra ou non être atteint un jour.

Le coup de chapeau final au surgénérateur commercial anglais, le pendant de Super-Phénix

fusion thermonucléaire contrôlée. A juger des retards successifs accumulés par la fission dans son expansion commerciale, il est certain que l'énergie H conserve encore ses chances, malgré les vingt ans que demandent encore les cher-

Type de réacteur	Magnox et filière graphite-gaz	Advanced Gas Reactor	CANDU	LWR et BWR filière américaine	Réacteur à haute température HTR	Eau-graphite	Surgénérateur (neutrons rapides)
Pays ayant adopté ce type de réacteur	France (jusqu'en 1970) Angleterre (jusqu'en 1975)	Angleterre	Canada	USA et tous pays ayant acheté les licences (G.-B., France, Allemagne)	Plusieurs pays dont Allemagne (prototypes)	URSS	Prototypes : France, URSS, Angleterre, USA (France : Phénix)
Combustible utilisé	Uranium métal naturel	Oxyde d'uranium enrichi à 2 %	Oxyde d'uranium naturel	Oxyde d'uranium enrichi à 3 ou 4 %	Carbure d'uranium enrichi à 93 %	Oxyde d'uranium enrichi à 1,8 %	Oxydes d'uranium et de plutonium et manchon d'uranium appauvri
Matériau utilisé pour le gainage des barres	Magnésium	Acier	Zirconium	Zirconium	Carbure de silicium	Alliage de zirconium et de niobium	Aiguilles d'acier
Réfrigérant utilisé	Gaz carbonique et azote (hélium)	Gaz carbonique	Eau lourde	Eau légère	Hélium	Eau légère	Sodium liquide
Corps employé comme modérateur de neutrons	Graphite	Graphite	Eau lourde	Eau légère	Graphite	Graphite	Pas de modérateur
Densité de puissance du cœur réactif (en kW/dm ³)	1	4,5	16	50 à 100	6	?	390

Surgénérateurs : la septième filière. Tout réacteur nucléaire exige un combustible, c'est à-dire un corps fissile, un modérateur pour ralentir les neutrons (sauf dans le cas du surgénérateur, réacteur à neutrons rapides) et un fluide caloporteur ou réfrigérant, qui récupère la chaleur produite dans le cœur pour alimenter les turbines. On caractérise généralement un type de réacteur par le réfrigérant et le modérateur employés. Ainsi, la filière développée par la France jusqu'en 1970, était dénommée « graphite-gaz » c'est-à-dire, qu'elle utilisait du graphite comme modérateur de neutrons et du gaz (gaz carbonique et azote) comme réfrigérant. L'U.R.S.S. a développé une filière « eau-graphite » avec du graphite comme modérateur et de l'eau légère comme réfrigérant. Les centrales aujourd'hui les plus répandues sont celles de la filière américaine employant l'eau légère aussi bien comme modérateur que comme réfrigérant. Seuls les surgénérateurs sont dépourvus de modérateur. Du sodium liquide est utilisé comme fluide caloporteur.

que la France et les pays associés comptent mettre en chantier dans les mois qui viennent, est donné sur un net aveu d'impuissance quant à l'avenir de cette formule, et après de longues mises en garde. On aura d'ailleurs noté que la fin de ce dernier paragraphe contredit curieusement la manière dont il commence.

Pour beaucoup de spécialistes, la question tourne, au fond, d'une part autour d'une sorte de lutte sourde entre le surgénérateur, qui représente l'aboutissement logique de vingt ans d'efforts pour la fission, et, d'autre part, la victoire certes encore incertaine de l'énergie de

chœurs pour l'amener à sa forme utilisable.

Si le surgénérateur exige quant à lui encore dix ans pour devenir l'équivalent des centrales électro-nucléaires de puissance actuelles, le fossé entre ces deux délais n'existe pratiquement plus et la question change du tout au tout puisqu'aux impératifs économiques, on peut opposer valablement — comme le fait d'ailleurs le rapport officiel anglais — la raison primordiale de seule sécurité.

(Traduction de l'auteur)

Charles-Noël MARTIN ■