

Le principe de la sûreté intrinsèque

*Aperçus des travaux en cours
sur l'application de ce principe aux réacteurs nucléaires*

par **Tor Pedersen**

L'énergie nucléaire est une source importante d'énergie pour l'avenir, mais le choix de ses options pourrait être mis en cause si de graves accidents, du genre de ceux de Three Mile Island ou de Tchernobyl, se répétaient çà et là de par le monde.

Les concepteurs du réacteur fondé sur le principe de la sûreté intrinsèque — Process Inherent Ultimate Safety (PIUS) — travaillent avec la conviction que les applications futures de l'énergie nucléaire à des fins civiles devraient reposer sur une technologie excluant les risques d'accidents graves grâce à l'incorporation à la conception des réacteurs de caractéristiques de sûreté intrinsèque protégeant l'installation contre les défaillances du matériel ou les erreurs humaines. Plusieurs pays industriels étudient déjà, ou envisagent d'étudier, ce concept particulièrement intéressant pour les pays qui songent à s'équiper en nucléaire.

En termes simples, disons que ce principe consiste à protéger l'intégrité du cœur du réacteur dans toutes les circonstances raisonnablement concevables résultant de perturbations graves, en lui donnant une configuration qui permette d'arrêter le réacteur et de le refroidir en comptant uniquement sur des phénomènes naturels, tels la gravité et les processus thermo-hydrauliques, dont les lois sont irréfutables. Le maintien de l'intégrité du cœur prévient tout rejet important de radioactivité, d'où un risque insignifiant de contamination de l'environnement.

Caractéristiques du réacteur

Après plus de dix ans de travail, la société ABB Atom a mis au point plusieurs projets de réacteurs du type PIUS, tous fondés sur la technologie et l'infrastructure éprouvée du réacteur à eau légère (LWR), dont la configuration a été modifiée, avec adjonction des composants spéciaux nécessaires à la sûreté intrinsèque. Un des premiers projets avait une puissance thermique de 1600 MW, pour une puissance électrique de 500 MW, et prévoyait un seul cœur et quatre circuits de refroidissement avec générateurs de vapeur et pompes, le tout inclus dans le vaste caisson en béton du réacteur. Plusieurs autres projets ont suivi, dont un du type modu-

laire permettant de grouper plusieurs unités comportant chacune un cœur et son circuit de refroidissement avec générateur de vapeur, pour obtenir la puissance souhaitée. En 1987, des études ont été entreprises avec participation étrangère sur une version du réacteur PIUS dont les générateurs de vapeur, avec leurs pompes, étaient montés à l'extérieur du caisson. Cette configuration a été choisie comme formule type. Ce projet de réacteur est prévu pour une puissance thermique de 2000 MW et une puissance électrique nominale de 640 MW (voir le tableau et la figure).

Le cœur, du type réacteur à eau sous pression, comporte 213 assemblages combustibles composés de barres du diamètre habituel pour cette filière, mais de longueur réduite. Il est placé au fond du caisson en béton précontraint rempli d'eau à forte teneur en bore. Il ne comporte ni barres de sécurité ni barres de commande. Le réglage de la réactivité se fait en modifiant la température du fluide de refroidissement et sa teneur en bore.

Ces caractéristiques sont sensiblement assouplies par rapport à celles du réacteur à eau sous pression courant, notamment la puissance linéique moyenne, les températures, les débits et les variations de pression résultantes.

Caractéristiques principales du réacteur PIUS-600

Puissance thermique du cœur	2000 MW
Puissance électrique nette	640 MWe
Température de l'eau circulante	18°C
Nombre d'assemblages combustibles	213
Hauteur active du cœur	2,50 m
Diamètre équivalent du cœur	3,76 m
Puissance linéique moyenne	11,9 kW/m
Puissance volumique moyenne	72,3 kW/l
Température d'entrée dans le cœur	260°C
Température de sortie	290°C
Pression de travail	9 MPa
Débit dans le cœur	13 000 kg/s
Taux de combustion moyen	45 000 MWd/t
Diamètre intérieur du caisson	12 m
Volume intérieur du caisson	3300 m ³
Hauteur totale du caisson	43 m
Épaisseur de la paroi	7 m
Générateurs de vapeur et pompes	4

Mr Pedersen est ingénieur électricien à la Division des réacteurs de ABB Atom, Västerås (Suède).

Le réglage de la réactivité pour compenser la combustion est assuré par un absorbeur consommable (gadolinium) incorporé à certaines barres de combustible, et le coefficient de température du modérateur reste fortement négatif pendant tout le cycle fonctionnel.

Le fluide caloripporteur sort du cœur du réacteur à 290°C et passe dans une colonne montante munie à sa partie supérieure de quatre buses qui le dirigent vers les quatre générateurs de vapeur à tubulure rectiligne et passage unique montés à l'extérieur du caisson. Les pompes principales sont incorporées à la partie inférieure de chaque générateur. Ce sont des versions agrandies des pompes sans joint et à moteur noyé utilisées sur les réacteurs à eau bouillante de ABB Atom.

Les conduites de retour pénètrent le caisson par des buses situées au même niveau que les conduites de sortie; le fluide à 260°C suit alors une colonne descendante jusqu'au plénum d'entrée situé sous le cœur. Pendant ce parcours, l'écoulement est accéléré et il existe une communication permanente entre la colonne descendante et le pressuriseur pour éviter l'effet de siphon qui se produirait en cas de rupture d'une conduite de retour et risquerait de vider le caisson. Il existe également des communications permanentes entre la colonne montante et la colonne descendante.

Un cylindre creux de un mètre de diamètre communiquant avec la cuve est situé sous l'entrée du cœur. Il contient des faisceaux de tubes qui ont pour fonction de réduire les turbulences afin de stabiliser la stratification de l'eau chaude du circuit du réacteur et de l'eau plus froide de la cuve. Cet ensemble appelé «stabilisateur à densité» est un des composants essentiels de la sûreté intrinsèque. La position de l'interface est déterminée par la mesure des températures, laquelle commande la régulation du débit des pompes principales du circuit de refroidissement afin de maintenir cet interface à son niveau dans les conditions normales d'exploitation. Un autre stabilisateur situé à la partie supérieure, dans le plénum collecteur de la colonne montante, communique avec celui-ci par de petits orifices. Il contient aussi des faisceaux de tubes comme le stabilisateur inférieur.

Cette configuration, qui assure une communication constante entre les stabilisateurs et le volume d'eau de la cuve à haute teneur en bore, est une composante fondamentale de la sûreté intrinsèque. Une circulation naturelle peut ainsi toujours s'établir à partir de la cuve, en passant par le stabilisateur inférieur puis par les tubulures d'alimentation du cœur, le cœur lui-même et la colonne montante jusqu'au niveau du stabilisateur supérieur qu'elle traverse pour repasser dans la cuve. En temps normal, cette circulation par convection est neutralisée par le débit des pompes principales qui stabilise l'interface eau chaude/eau froide dans le stabilisateur inférieur et dans le stabilisateur supérieur où, parallèlement, la mesure des températures règle le volume du circuit primaire. Le débit de ce circuit est déterminé par la différence entre la température de sortie du cœur et celle de l'eau de la cuve. La différence de pression qui en résulte entre l'entrée du cœur et le sommet de la colonne montante doit correspondre à la différence de pression statique entre les interfaces des deux stabilisateurs. Les pompes servent à maintenir l'équilibre de pression dans ces stabilisateurs dans les conditions normales d'exploitation en régime continu ou modulé. La rupture subite de

cet équilibre, sous l'effet d'un fort transitoire ou en cas d'accident, par exemple, aurait pour effet de rétablir la circulation naturelle de l'eau boratée de la cuve à travers le cœur, assurant à la fois l'arrêt du réacteur et son refroidissement continu. La partie supérieure des deux stabilisateurs située au-dessus de l'interface contient normalement de l'eau du circuit primaire, dont l'effet tampon empêche l'intrusion de l'eau de la cuve, prévenant ainsi les arrêts intempestifs du réacteur en cas de perturbation mineure des conditions d'exploitation.

L'eau boratée est refroidie de deux façons: par circulation forcée à travers des échangeurs situés à l'extérieur du caisson du réacteur et par un système passif comportant des refroidisseurs installés dans la cuve et reliés à des boucles à thermo-siphon passant par des tours de réfrigération à l'air libre construites aux quatre coins du bâtiment du réacteur. Cette circulation par convection assure le refroidissement de l'eau de la cuve en cas d'accident et empêche son ébullition même si un circuit tombe en panne. Si tous les circuits de refroidissement de la cuve tombaient en panne, la masse d'eau elle-même assurerait le refroidissement du réacteur pendant une semaine.

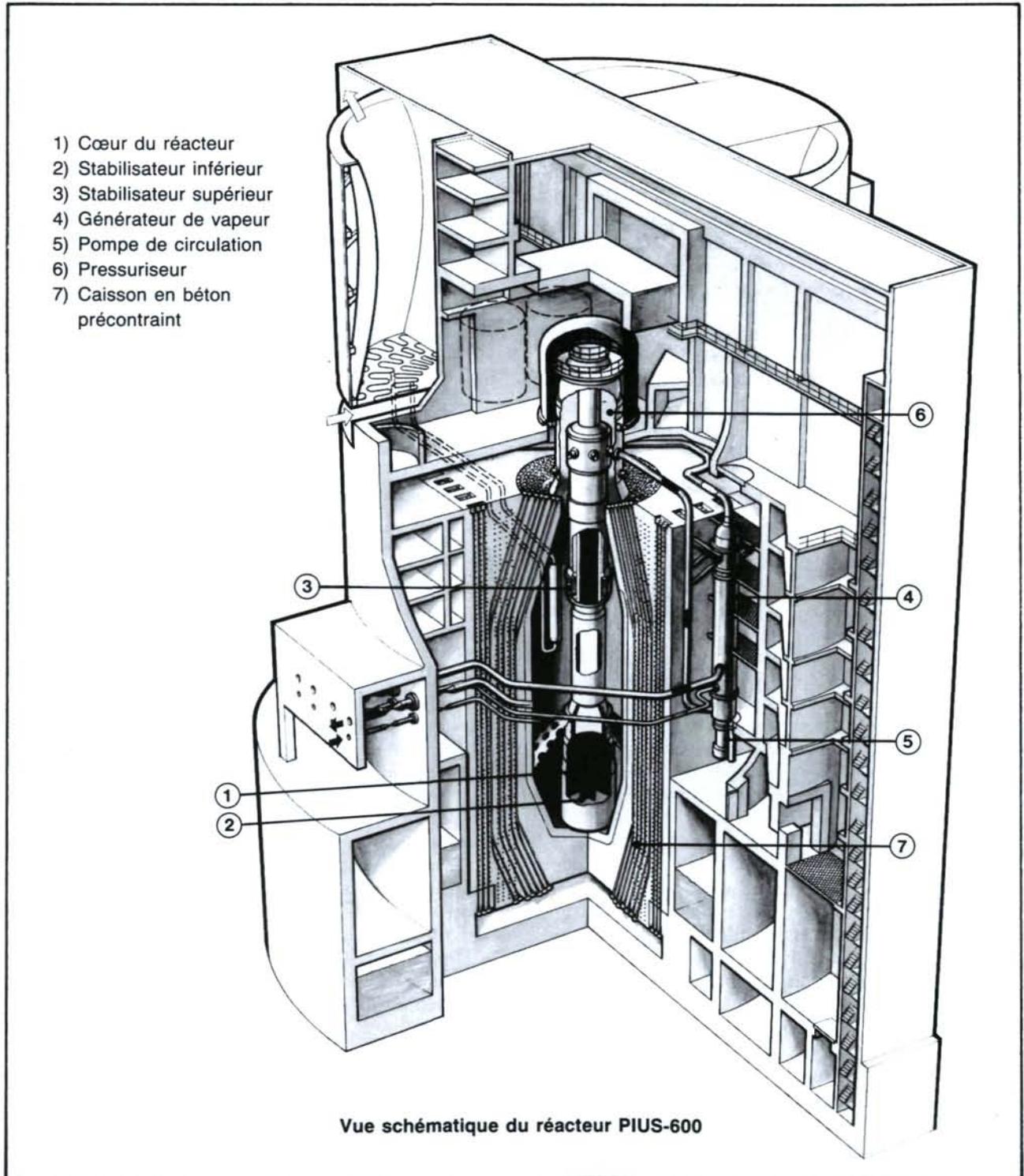
La cuve du réacteur proprement dite a un diamètre intérieur d'environ 12 mètres, une profondeur d'environ 38 mètres et un volume de quelque 3300 mètres cubes. Le caisson monobloc en béton a une section d'environ 27 mètres et une hauteur d'environ 43 mètres. Il est ancré sur la dalle des fondations par les armatures du béton. Sa résistance à la pression est assurée par un réseau serré de câbles de précontrainte qui le ceinturent horizontalement et le renforcent verticalement, et par des entretoises.

L'intérieur est revêtu d'un blindage en acier inoxydable doublé d'une chemise également en acier incluse dans le béton à un mètre environ de profondeur dans la paroi, dont la hauteur dépasse le niveau du stabilisateur supérieur afin que l'eau ne puisse pas descendre au-dessous de ce niveau en cas de fuite du premier blindage. Pour les mêmes raisons, les pénétrations dans le béton sont situées au-dessus.

La cuve est surmontée d'un dôme en acier assujéti par des câbles indépendants ancrés au fond du caisson. C'est là que sont situées les buses de raccordement des conduites de sortie et de retour des circuits forcés de refroidissement et certaines tubulures; il contient également le plénum supérieur de la colonne montante et le pressuriseur.

Le réacteur, son caisson et ses circuits sont enfermés dans une vaste enceinte de confinement à décompression dont les circuits de purge aboutissent à un volumineux condenseur associé au puisard. Tous les composants et organes contenant de l'eau du circuit du réacteur ou de la cuve, sous pression et à haute température, sont situés à l'intérieur de ce confinement qui est prévu pour résister à une double rupture de la plus grosse conduite. Cette enceinte en béton armé peut résister au choc d'un avion qui s'écrase. Elle est doublée d'une chemise en acier qui assure son étanchéité.

La puissance du réacteur est réglée par la teneur en bore et la température du fluide caloripporteur. Dans les conditions normales d'exploitation, il est possible de régler la puissance sans modifier la concentration de bore, grâce au coefficient de température fortement



Vue schématique du réacteur PIUS-600

négatif du fluide de refroidissement. Il suffit simplement de faire varier l'alimentation des générateurs de vapeur. Si le débit augmente, la température de retour diminue, et le réacteur monte en puissance. Cette méthode peut servir pour des variations de $\pm 40\%$ à raison de 20% par minute. Pour moduler la puissance en fonction de la charge, ce qui se fait quotidiennement, il suffit de modifier légèrement la concentration de bore dès le premier jour au début du cycle. Pour les jours suivants, aucun ajustement de la concentration n'est nécessaire. Au-delà

de ces limites, l'ajustement de la teneur en bore est nécessaire pour maintenir la température de sortie du caloporteur dans des limites acceptables. Il se fait en injectant de l'eau distillée si l'on veut augmenter la puissance ou de l'eau à forte teneur en bore si l'on veut la réduire, et en purgeant une quantité d'eau égale à la quantité injectée; la même opération se pratique sur les réacteurs à eau sous pression du type courant.

L'installation comporte aussi des chaînes d'instrumentation, des dispositifs de protection, des fonctions

logiques et des systèmes de commande pour l'arrêt du réacteur, l'évacuation de la chaleur résiduelle, l'isolement du confinement, etc., analogues à ceux qui équipent les réacteurs à eau légère du type courant, mais leur importance pour le maintien de la sûreté est sensiblement réduite. Les matériels dont se composent ces divers systèmes sont séparés des autres systèmes et logés dans des compartiments physiquement bien protégés, au fond du bâtiment du réacteur. Le système de protection du réacteur, équipé d'une logique à coïncidence deux-sur-quatre, a pour fonction de déclencher la réduction de puissance, l'arrêt du réacteur ou son arrêt d'urgence lorsque les paramètres de fonctionnement excèdent les limites fixées.

Dans la plupart des cas, le remède consiste à ramener le réacteur à un niveau inférieur de puissance en agissant sur le débit du circuit de refroidissement, ou encore à mettre le réacteur au ralenti chaud (puissance nulle) ou à l'arrêt chaud en opérant une nouvelle réduction de puissance par injection d'eau à forte teneur en bore dans le circuit primaire. L'arrêt d'urgence, qui ne doit intervenir que rarement, est déclenché par l'arrêt d'une des pompes principales. L'eau de la cuve entre alors dans le circuit primaire et amène le réacteur à un état sous-critique chaud. Les structures du circuit primaire subissent de ce fait un rapide refroidissement de quelque 50 à 60°C, mais ce transitoire n'inflige pas de contraintes thermiques critiques aux composants.

Un certain nombre des dispositifs de sûreté qui équipent les réacteurs à eau légère industriels de type courant ont été éliminés: les barres de commande et l'injection de bore sont remplacées par les stabilisateurs à densité; le décompresseur automatique n'est plus nécessaire; l'alimentation auxiliaire en eau pour l'évacuation de la chaleur résiduelle est remplacée par le volume d'eau de la cuve; l'évacuation de la chaleur du confinement et les circuits d'aspersion sont remplacés par le refroidissement passif de la cuve. Les dispositifs importants pour la sûreté, tels le circuit fermé d'eau de refroidissement, les systèmes de chauffage, de ventilation et de commande, ainsi que les alimentations de secours en courant alternatif sont remplacés par des organes sans fonction de sûreté, ce qui permet de simplifier encore l'installation. Les autres fonctions de sûreté sont assurées par: le déclenchement de l'arrêt d'urgence, pour protéger le réacteur, par l'arrêt d'une des pompes du circuit de refroidissement; l'isolement du confinement par la fermeture des registres; les soupapes de sûreté de la cuve du réacteur, actionnées par les différences de pression; la fonction de refroidissement passif de la cuve du réacteur. Or, seule cette dernière fonction est nécessaire pour protéger le cœur, et seulement après le délai de grâce d'une semaine.

En conséquence, une installation de ce genre devrait être plus facile à exploiter et à entretenir qu'une centrale à eau légère courante, d'autant que la crainte d'un accident grave toujours possible n'existerait plus.

Réponses aux forts transitoires

Le comportement des diverses centrales à l'étude fondées sur le principe de la sûreté intrinsèque, sous l'effet de forts transitoires et des conditions dues à un accident, a été beaucoup étudié au cours des années, en partie

expérimentalement, mais surtout par simulation sur ordinateur, opération pour laquelle un code informatique très efficace a été mis au point spécialement pour simuler la dynamique du comportement. On s'est assuré que la simulation du comportement du réacteur et de la centrale était suffisamment précise en procédant à des essais sur des montages expérimentaux, dont on calculait à l'avance les résultats.

Nombre de transitoires et de situations d'accident ont ainsi pu être analysés et ont toujours abouti à un arrêt du réacteur ou à la réduction de la puissance à un niveau sûr. On n'a constaté aucune séquence d'accident laissant le cœur à découvert ou provoquant l'ébullition nucléée.

En ce qui concerne le confinement, les spécifications pour une centrale à sûreté intrinsèque et pour les centrales à eau légère de type courant diffèrent considérablement. Dans le cas de la première, en effet, l'intégrité du combustible est assurée par les fonctions passives autonomes, le cœur du réacteur ne peut pas être découvert et le combustible ne peut pas subir de surchauffe à la suite d'un incident crédible. Le rejet des matières radioactives dans le confinement à la suite d'une rupture de conduite peut provenir d'une fuite éventuelle au niveau des barres de combustible, dans le cœur du réacteur, avant l'accident; mais l'accident lui-même ne causera pas de dommages supplémentaires au combustible. Seule une partie de l'eau du circuit primaire sera rejetée dans le confinement pendant la dépressurisation du réacteur.

À la suite de cette première opération, le cœur sera refroidi par les courants de convection qui s'établiront dans la cuve et transféreront la chaleur de désintégration à l'eau qu'elle contient. Cette circulation naturelle assure toujours l'évacuation de la chaleur résiduelle dans l'atmosphère par l'intermédiaire des tours de réfrigération à l'air libre. L'eau de la cuve n'entrera jamais en ébullition.

Le bref rejet de vapeur et d'eau chaude pendant la purge du réacteur est récupéré par le condenseur. Dans l'enceinte de confinement, la pression montera à 2 bars, mais les rejets de vapeur ne peuvent être de longue durée et la pression diminuera jusqu'à une valeur légèrement supérieure à la pression atmosphérique dans un délai de 2 à 3 heures, du fait de la condensation de la vapeur sur les structures et les composants. Il n'est pas nécessaire de prévoir des dispositifs de refroidissement de sûreté pour le confinement.

Les quantités de matières radioactives libérées dans le confinement seront peu importantes, et comme la surpression momentanée de cette enceinte par rapport à l'atmosphère ne sera pas excessive, le débit maximal des rejets dans l'environnement sera insignifiant.

On a calculé que les doses à la limite du site seraient inférieures au niveau d'intervention fixé par l'Agence américaine de protection de l'environnement à 1 rem pour l'organisme entier et 5 rems pour la thyroïde. Tout cela devrait faciliter la planification des mesures d'urgence à prévoir hors du site.

Construction de la centrale

Plusieurs éléments de la centrale sont d'une importance capitale pour déterminer la marche à suivre pendant la construction; ce sont le caisson en béton

précontraint et la partie du bâtiment du réacteur qui sert d'enveloppe de confinement, et le dôme en acier qui prolonge la cuve du réacteur. Le problème de la construction a été étudié en détail par l'équipe de spécialistes du génie civil, du montage et du réceptionnement qui s'est occupée de la centrale suédoise Oskarshamn-3, dont la mise en service a eu lieu 57 mois après la première coulée de béton. Le confinement du projet de centrale à sûreté intrinsèque est analogue à celui d'Oskarshamn-3 et les mêmes méthodes peuvent être utilisées pour construire le caisson. L'équipe a donc pu établir un calendrier de construction pour cette nouvelle centrale en se fondant sur sa propre expérience.

En résumé, la durée du chantier serait de 45 mois au total entre la première coulée de béton et la mise en service, le combustible ayant été chargé le 39ème mois. Peut-être même le délai sera-t-il un peu plus court, car on n'a pas tenu compte dans ce calcul du temps que l'on pourrait gagner en préfabriquant sur place, ou en usine, ou en modularisant certains éléments.

Un devis détaillé clefs en mains a été établi pour un exemplaire X d'une série et pour une centrale classique de pointe à eau bouillante de 700 MWe, fabriquée par ABB Atom dans les conditions scandinaves. Il montre qu'une centrale PIUS-600 est sensiblement plus avantageuse que la centrale à eau bouillante de 700 MWe en ce qui concerne le montant de l'investissement par kWe net.

Les conditions de pression et de température de la vapeur étant inférieures à celles de la centrale classique à eau bouillante, le rendement thermique est également moins bon, de sorte que le cycle du combustible est un peu plus onéreux que celui de cette dernière. En revanche, la construction est plus rapide et l'on prévoit des dépenses de personnel moins importantes vu la simplicité de l'installation. En conséquence, les frais d'exploitation sont jugés moindres que pour la centrale à eau bouillante de 700 MWe.

Regard sur l'avenir

La société ABB Atom étudie dans le détail, depuis plus de dix ans, diverses versions d'un réacteur fondé sur le principe de la sûreté intrinsèque. Ces travaux, auxquels ont contribué des compagnies d'électricité et autres organismes, ont abouti à un projet prometteur dont les composants intègrent un maximum de technologie éprouvée. Les caractéristiques nouvelles ont été suffisamment bien étudiées pour que l'on ne doute pas des possibilités techniques de réalisation et de viabilité du concept, en particulier du point de vue de sa sûreté et de son comportement en exploitation. Des essais complémentaires sont néanmoins prévus pour obtenir les données et l'information nécessaires à l'établissement de plans détaillés et à la réalisation d'une centrale industrielle.

Le projet PIUS a été discuté avec les compagnies d'électricité de divers pays et, à l'heure actuelle, on envisage l'étude des possibilités pratiques de réalisation et l'étude en commun d'un projet adapté aux conditions italiennes. Une étude de faisabilité est en cours en Chine et d'autres pays s'intéressent à la question. Aux Etats-Unis, on cherche à lancer une entreprise commune pour commercialiser le modèle et le soumettre à la Commission de réglementation nucléaire en vue de son homologation; il a d'ailleurs déjà été évalué en 1985. Il en résultera peut-être la constitution d'une équipe mixte pour étudier l'adaptation de l'installation aux conditions américaines ainsi que les possibilités de commercialisation dans le pays.

Le réacteur fondé sur le principe de la sûreté intrinsèque représente une étape importante dans l'évolution de la sûreté nucléaire tout en s'en tenant à la technologie éprouvée des réacteurs à eau légère, ce qui réduit d'autant les essais nécessaires aux vérifications finales des plans. Les devis et le calendrier de construction montrent que ce réacteur soutient la concurrence des autres sources d'énergie.

