

Les réacteurs à eau légère de demain aux Etats-Unis

Plusieurs conceptions nouvelles sont à l'étude

par J.J. Taylor, K.E. Stahlkopf, et J.C. DeVine, Jr.

En 1983, l'Institut de recherche sur l'énergie électrique (EPRI) a lancé un programme d'action pour l'étude d'une nouvelle génération de réacteurs à eau légère (LWR) destinés aux compagnies d'électricité américaines*. Cette initiative est due au service consultatif de l'EPRI pour les exploitants, préoccupé qu'il était par l'idée qu'en l'absence d'un tel programme les exploitants risquaient, vers la fin des années 90, de ne pas disposer de réacteurs à eau légère modernes, perfectionnés et éprouvés, pour faire face à l'augmentation prévue de la demande d'électricité. Le programme est fondé sur deux considérations majeures:

- Constitution d'un comité directeur hautement qualifié chargé d'orienter l'action et de veiller à ce que l'expérience acquise par l'exploitation des 110 centrales nucléaires industrielles du pays était recyclée dans l'étude de la prochaine génération de réacteurs.

- Etablir sans tarder d'étroites relations de travail avec la Commission de réglementation nucléaire (NRC) pour s'assurer que les modèles avancés (ALWR) mis au point dans le cadre du programme, non seulement répondront aux vœux des compagnies d'électricité sur le plan opérationnel, mais aussi se conformeront aux normes fixées par la NRC, facilitant ainsi les formalités d'homologation.

Dès l'acte de foi de ses promoteurs, le programme s'est installé et développé au point qu'il est actuellement un des principaux exposants de la nouvelle orientation de la technologie des réacteurs à eau légère. L'idée première s'est matérialisée en un schéma de centrale présentant les caractéristiques suivantes:

- nombreuses simplifications par rapport aux centrales en service;
- solidité et faible susceptibilité, avec d'amples marges de sécurité;
- bases technologiques solides et éprouvées; conception «avancée» en ce sens qu'elle retient le meilleur de l'expérience acquise;

M. Taylor est vice-président de la Division de l'énergie nucléaire de l'Institut de recherche sur l'énergie électrique de Palo Alto (Californie). M. Stahlkopf est directeur du Département d'études de matériaux et de systèmes et M. DeVine est directeur des programmes à la Division de l'énergie d'origine nucléaire.

* «Next Generation Light Water Reactor» par Stahlkopf, K.E., Noble, D.M., et Taylor, J.J., *Proceedings of the American Power Conference*, volume 48, Institut de technologie de l'Illinois (1986).

- primauté à l'interface homme-machine et aux besoins des opérateurs chargés d'assurer le bon fonctionnement de la centrale dans des conditions de sûreté.

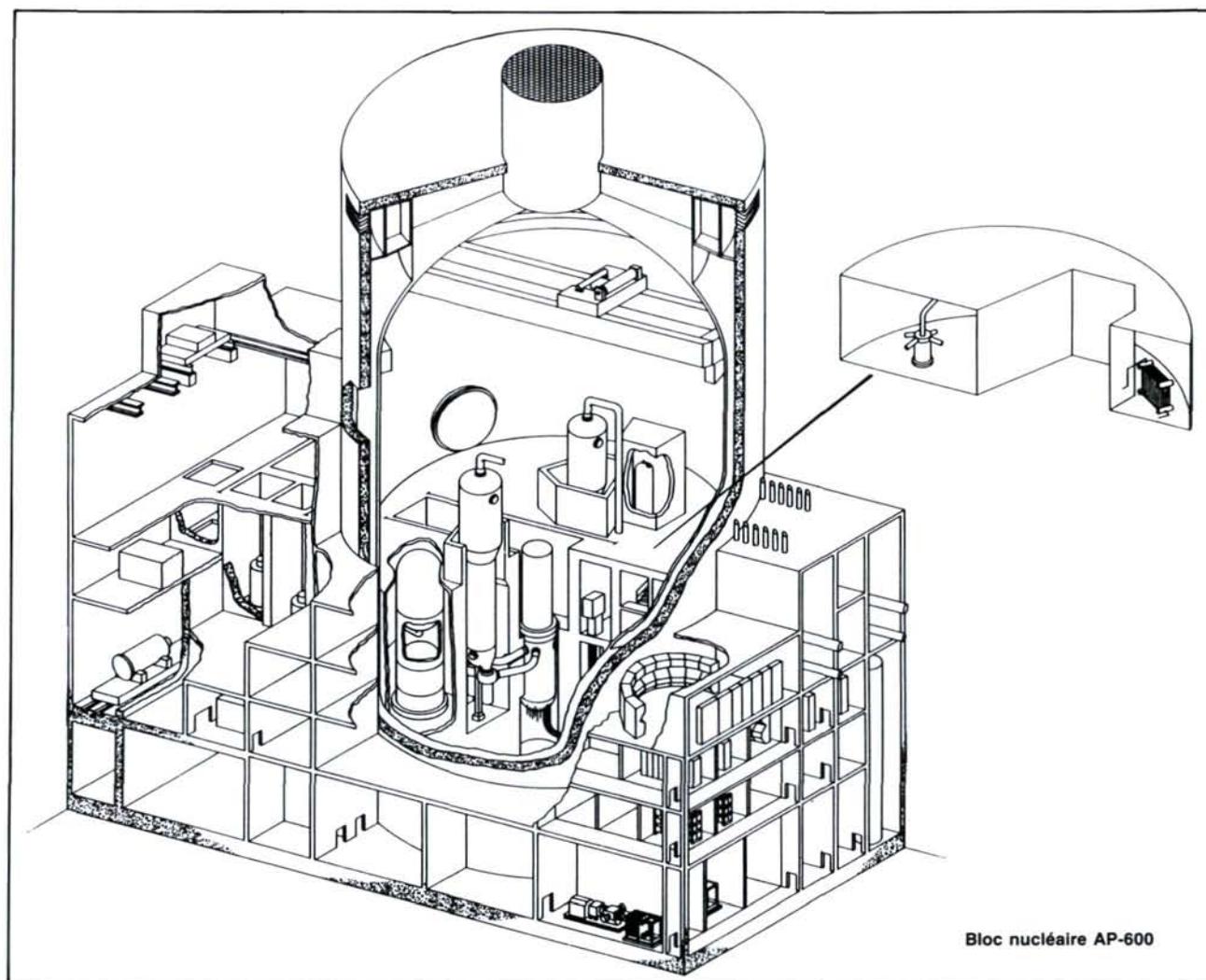
La notion de «centrale évolutive»

Pour mettre ces principes en œuvre, l'équipe chargée de l'exécution du programme a décidé de répertorier les desiderata des exploitants et de faire la liste de toutes les caractéristiques de conception et de performance que devrait présenter le modèle «évolutif» du ALWR*. En principe, il s'agira d'un réacteur de grande puissance — environ 1200 MWe — dont les systèmes de sûreté, l'instrumentation et les dispositifs de commande seront beaucoup simplifiés et améliorés. Il est directement inspiré du LWR avancé d'aujourd'hui et ses systèmes de sûreté, de même que son cadre réglementaire, suivent dans l'ensemble la règle habituelle. En rédigeant le document des spécifications, l'équipe a étroitement collaboré avec la NRC pour préciser et résoudre certaines questions importantes en suspens relatives à la sûreté des réacteurs afin d'inclure les solutions dans le document en préparation.

Ce travail doit finalement aboutir à la rédaction d'un document exhaustif résumant les observations de l'ensemble des futurs utilisateurs et soumis à l'approbation de la NRC. Douze des 13 chapitres sont achevés et servent déjà de référence, tant aux Etats-Unis que dans le reste du monde, pour l'étude des réacteurs prévus pour la fin du siècle.

Le document propose nombre d'améliorations de conception concernant la sûreté et la fiabilité, notamment: 1) marges thermiques accrues; 2) contrôle renforcé de la réactivité, c'est-à-dire coefficient de température négatif dans tout le cycle du combustible; 3) abaissement de la température maximale du fluide de refroidissement; 4) meilleure résistance de la cuve à la fragilisation; 5) structure annulaire de la cuve évitant les soudures verticales; 6) alimentation de secours en courant alternatif sur le site même; 7) évacuation de la chaleur de désintégration par convection;

* «US ALWR Program Set Out Utility Requirements for the Future», par Stahlkopf, K.E., DeVine, J.C., et Sugnet, W.R., *Nuclear Engineering International* (novembre 1988) et «Light Water Cooled Reactors — Expected Developments», par Culler, F.L., Stahlkopf, K.E., et Braun, C., *Revue Roumaine de Physique* (avril 1988).



Bloc nucléaire AP-600

8) système d'évacuation forcée de la chaleur de désintégration; 9) volume accru de fluide de refroidissement; 10) enveloppe de confinement plus ample et plus résistante; 11) fonctions de sûreté indépendantes des fonctions normales d'exploitation; 12) interface homme-machine considérablement amélioré, c'est-à-dire commande d'un maniement plus facile et plus sûr.

Outre les progrès techniques qu'il a permis de réaliser jusqu'à ce jour, le programme a centralisé et facilité la collaboration des exploitants de centrales américaines et internationales à l'orientation de l'étude des réacteurs dont ils auront besoin dans l'avenir. Dès ses modestes débuts, le programme s'est fait remarquer et respecter par les participants américains et il a éveillé l'intérêt de plusieurs exploitants de pays d'Asie et d'Europe, tels Kansai Electric (Japon), Taipower (Taiwan, Chine), KEPCO (Corée), EDF (France), ENEL (Italie) et KEMA (Pays-Bas), qui prennent une part active à ses activités et lui apportent une aide financière et technique. La synergie de ces divers apports, toujours plus nombreux, a eu pour effet immédiat d'accroître le bagage technique et la crédibilité du programme et, du même coup, son influence sur les constructeurs améri-

cains et internationaux de chaudières nucléaires, ce qui, à son tour, suscitait de nouveaux appuis aux Etats-Unis et à l'étranger.

La «passivité»

Tout en travaillant sur les caractéristiques du réacteur évolutif, l'équipe du programme ALWR a commencé à étudier les possibilités d'une nouvelle conception du LWR dénommé le «réacteur passif»*. Il s'agirait d'un petit réacteur dont les fonctions de sûreté essentielles seraient essentiellement fondées sur des phénomènes passifs, telles la gravité, la circulation naturelle et l'accumulation d'énergie.

Ce projet a retenu l'attention des exploitants pour plusieurs raisons:

- Vu la grande simplicité des systèmes de sûreté passifs, il est possible de simplifier considérablement le réacteur (en réduisant le nombre de vannes, de pompes,

* The US Advanced Light Water Reactor Program — A Case for Simple Passive Safety Systems, par Taylor, J.J. et Stahlkopf, K.E., *Proceedings, International Topical Meeting on Safety of Next Generation Power Reactors*, Seattle, Washington (mai 1988).

de réservoirs, d'instruments, etc.), ce qui réduit d'autant les coûts et les délais de construction, et facilite l'exploitation et la maintenance de la centrale.

● Grâce à la suppression des composants actifs et de l'intervention humaine, le réacteur passif peut supporter un éventail beaucoup plus large de perturbations et d'incidents, tant internes qu'externes, telle une panne généralisée d'alimentation électrique.

Un modèle type de 600 MWe a été choisi pour l'étude. Théoriquement, le réacteur passif peut être de n'importe quelle taille, mais il est probable qu'au dessus de 600 MWe il devienne encombrant ou peu intéressant au point de vue du prix, à cause des dimensions relativement importantes que prendraient certains composants (la cuve du réacteur, les réservoirs d'eau de refroidissement). En outre, un réacteur de moindre puissance, dans la gamme des 500 à 600 MWe, présente en soi l'avantage de pouvoir mieux s'adapter, le cas échéant, aux plans d'expansion de la puissance installée de la plupart des compagnies d'électricité des Etats-Unis. Par ailleurs, le choix de petites unités permet d'abrèger les délais de construction, favorise la modularisation des matériels et l'exploitation de l'expérience acquise avec les tranches identiques, et autres facteurs favorables à l'économie générale des centrales.

Le premier volet du programme d'études du réacteur passif avancé a consisté à organiser un concours de concepteurs d'où sont sortis deux projets intéressants de 600 MWe — l'un à eau sous pression et l'autre à eau bouillante — qui ont été retenus. Les deux projets comportent des systèmes de sûreté passifs et des améliorations fondamentales par rapport aux réacteurs actuels. La plus importante est que l'opérateur n'a pas à intervenir pendant trois jours après un événement de référence pour protéger la centrale ou le public.

Le second volet, exécuté conjointement avec le Département de l'énergie des Etats-Unis, consiste à développer les aspects techniques de la conception et à étudier le matériel et les systèmes.

Les deux projets, dont la réalisation technique est tout juste commencée, sont déjà très prometteurs. En voici une brève description:

Projet à eau sous pression. L'étude de ce réacteur avancé passif appelé AP-600 est confiée à une équipe dirigée par la Westinghouse en collaboration avec Avondale Industries, Burns & Roe, et d'autres encore*. Cette unité de 600 MWe comporte un système amélioré de refroidissement équipé de pompes à moteur gainé directement montées sur la buse de sortie du générateur de vapeur (voir la figure). Cette solution évite un coude, ce qui réduit d'autant la résistance du circuit et améliore sa performance en cas de perte de fluide de refroidissement due à une petite avarie, et simplifie la structure de l'ensemble pompe/générateur, qui n'a plus besoin d'un seul support.

Le projet prévoit un échangeur de chaleur à convection qui permet au circuit de refroidissement d'évacuer la chaleur de désintégration aux conditions de température et de pression à plein régime, éliminant ainsi le système de sûreté à alimentation forcée. Le

Comparaison de la masse de matériel de l'AP-600 et du réacteur classique à eau sous pression à double circuit

Matériels	Réduction
Vannes	60%
Grosses pompes	50%
Conduites	60%
Echangeurs de chaleur	50%
Gaines de chauffage, ventilation et réfrigération	35%
Structures antisismiques	60%
Câblage de commande	80%

système à gravité de refroidissement d'urgence du cœur doté de nourrices à la pression de travail, le bac d'immersion du combustible inclus dans le confinement ainsi que le dispositif de dépressurisation permettent de supprimer aussi les pompes de ce circuit.

Le refroidissement de l'enveloppe de confinement est également passif. L'enceinte de confinement cylindrique en acier est entourée d'un bouclier en béton muni d'évents; l'espace prévu entre les deux structures permet à l'air de circuler. L'eau peut s'écouler par gravité hors de l'enceinte en acier, augmentant ainsi le coefficient de transfert thermique par évaporation, pendant une journée environ après l'accident.

Ces solutions assurent passivement les fonctions essentielles de sûreté tout en permettant de réduire considérablement le nombre de pompes, vannes et circuits électriques et de refroidissement.

L'élimination du système actif de refroidissement d'urgence du cœur, avec ses pompes, vannes et conduites, et l'introduction de caractéristiques passives permettent de simplifier considérablement par rapport aux installations classiques. Il en résulte une forte réduction des matériels et des composants par comparaison avec les réacteurs classiques de 600 MWe de la Westinghouse (voir le tableau).

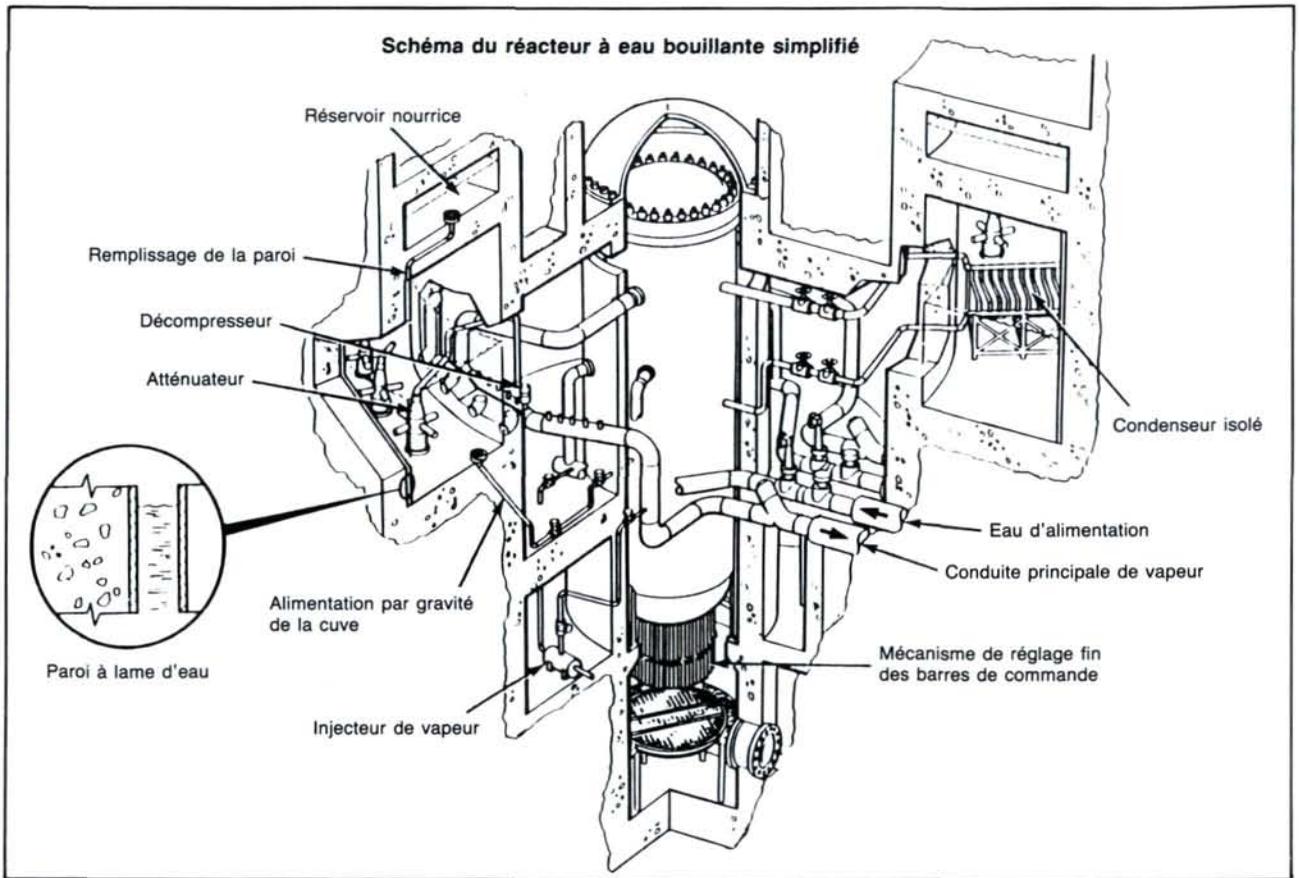
Projet à eau bouillante. Une équipe dirigée par la General Electric et à laquelle participent Bechtel et l'Institut de technologie du Massachusetts est déjà bien avancée dans l'étude d'une version à eau bouillante (SBWR) du modèle passif à eau légère*. (Voir la figure page 16.)

Il s'agit d'un réacteur de 600 MWe qui répond lui aussi à une démarche ambitieuse, à savoir non-intervention de l'opérateur pendant les trois jours suivant un accident endommageant le cœur, et trois ans de délai de construction.

Le SBWR est prévu pour fonctionner à pleine puissance sans pompe de circulation. L'élimination de ces accélérateurs et des conduites associées permet de simplifier la cuve, de rendre le réacteur moins vulnérable aux pertes de fluide de refroidissement et de

* «AP-600 Development», par Vijuk, R. et Bruschi, H., *Nuclear Engineering International*, 33, page 23 (novembre 1988).

* «ASBWR, An Advanced Simplified Boiling Water Reactor», par Duncan, J.D. et McCandless, R.J., et «Improvements in Boiling Water Reactor Designs and Safety», par Wolfe, B.R. et Wilkins, D.R., *Proceedings, International Topical Meeting on Safety of Next Generation Power Reactors*, Seattle, Washington (mai 1988).



simplifier la maintenance. La cuve agrandie pour faciliter la convection ménage un volume d'eau plus important au-dessus du cœur, ce qui est un avantage supplémentaire au début d'une perturbation.

Les caractéristiques de sûreté du réacteur sont originales et simples à la fois : système de refroidissement par gravité qui maintient le cœur immergé et refroidi en cas de perte de fluide de refroidissement ; injection de vapeur résiduelle comme propulseur de l'eau d'appoint pour compenser une fuite en cas de panne d'alimentation en courant alternatif ; condenseur isolé dans un réservoir d'eau surélevé, pouvant évacuer de la chaleur résiduelle par convection, et confinement à décompression refroidi passivement en cas d'accident.

Ces caractéristiques passives permettent à l'AP-600 et au SBWR de résister à tous les événements de référence, sans qu'il y ait besoin de prévoir un groupe électrogène de secours ou une alimentation en courant alternatif du type 1E.

Réacteur de sûreté intégral

Outre le SBWR et l'AP-600 dont s'occupent l'Institut de recherche sur l'énergie électrique et le Département de l'énergie, un troisième concurrent est entré tardivement dans la course des réacteurs passifs avancés à eau légère : le réacteur de sûreté intégral (SIR). Il est étudié conjointement par Combustion Engineering, Rolls Royce and Associates Ltd., Stone & Webster Engineering Corporation et l'Autorité de l'énergie atomique du

Royaume-Uni*. Ce projet se distingue par l'inclusion du circuit primaire de refroidissement avec son pressuriseur et ses générateurs de vapeur dans la cuve qui contient le cœur du réacteur, les pompes étant montées sur les parois de celle-ci, ce qui élimine les conduites que comporte normalement le circuit de refroidissement primaire des réacteurs à eau sous pression de type classique (voir la figure).

Les systèmes de sûreté du SIR sont essentiellement passifs, comptant sur la circulation par convection et une grande inertie thermique, et non sur des organes actifs alimentés en courant alternatif. La puissance de ce réacteur est limitée à 325 MWe par des considérations pratiques de construction et de transport du fait de la taille de sa cuve qui contient non seulement le cœur du réacteur mais aussi l'ensemble du circuit primaire, comme on vient de le voir. Plusieurs caractéristiques sont particulières à ce réacteur, dont le confinement à décompression et ses 12 générateurs de vapeur cylindrique à passage unique, dont 11 seulement suffisent pour atteindre la pleine puissance.

La commande est assurée par des barres de commande et des poisons combustibles, les barres de compensation au bore qui équipent normalement les réacteurs à eau sous pression étant éliminées par souci de simplification et de protection contre la corrosion. Bien que l'équipe de concepteurs du SIR ne

* «The SIR Project», par Hayns, M., *Atom* (juin 1989).

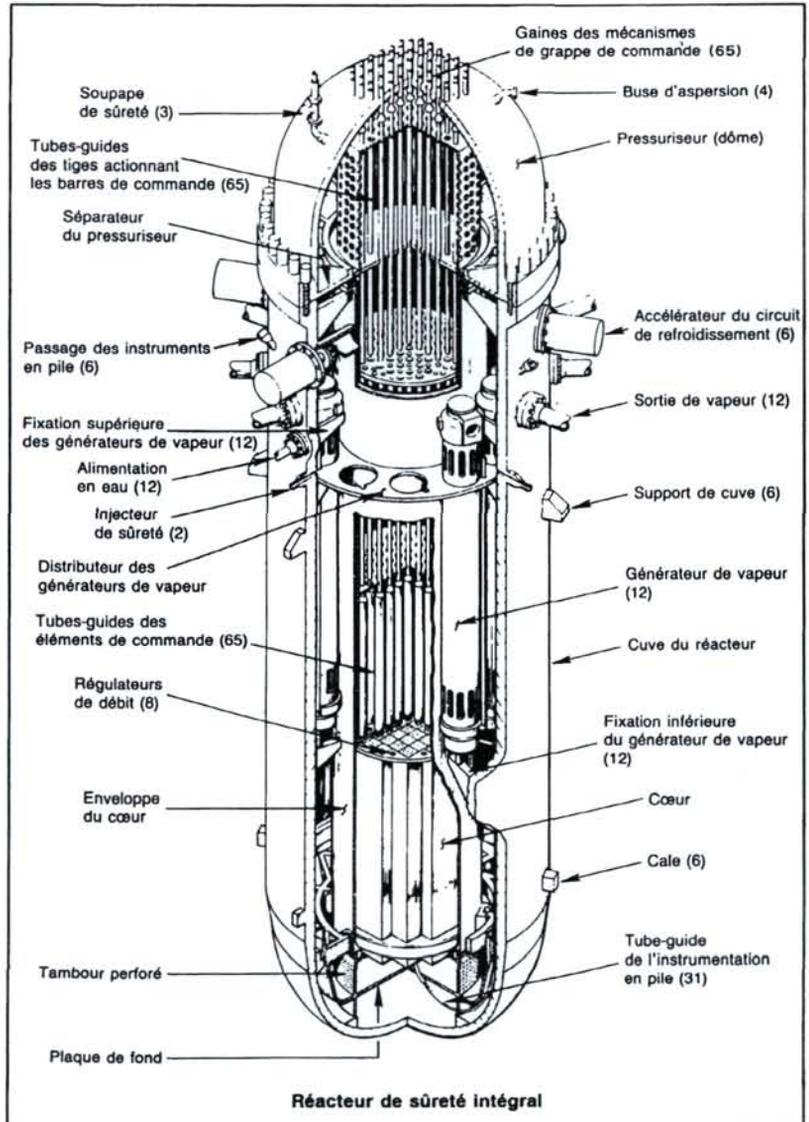
participe pas actuellement au programme de l'Institut et du Département de l'énergie sur le réacteur de pointe à eau légère, elle a fait part de son intention de se conformer aux normes actuellement à l'étude dans le cadre de ce programme.

A l'origine, le projet de centrale passive éveillait la curiosité mais venait en queue des préoccupations du programme sur les réacteurs avancés à eau légère. L'idée semblait bonne, certes, mais il y avait beaucoup à faire pour la développer et, qui plus est, elle impliquait un changement radical d'orientation en matière de technologie et de doctrine. Néanmoins, à mesure que les travaux avançaient, les compagnies d'électricité des Etats-Unis et du monde entier s'y sont bientôt intéressées. Les deux premiers volets du programme ont été une réussite technique et promettaient de belles réalisations pour l'avenir. Les projets qui en sont issus répondent aux orientations et aux principes techniques initialement fixés par le comité directeur du programme. Une centrale passive est extrêmement simplifiée par rapport aux centrales actuelles; elle est de constitution robuste et comporte d'amples marges de sécurité. Elle est aussi particulièrement «patiente» avec les opérateurs en ce qu'elle accepte de longs délais d'intervention humaine en cas de perturbation ou de situation d'urgence. Elle n'en respecte pas moins les principes fondamentaux et repose sur une technologie éprouvée — le réacteur passif est en quelque sorte «un retour aux sources» compte tenu des enseignements (parfois momentanément oubliés) de l'expérience acquise depuis les premiers pas de la technologie des réacteurs à eau légère.

Lorsque le deuxième volet du programme sera terminé, en principe dans les premiers mois de 1990, le concept du réacteur passif aura été passé au crible. Un document récapitulatif des caractéristiques de l'installation sera prêt et approuvé par le comité directeur et les fondements de la réglementation de la sûreté passive seront établis.

Les schémas de principe fondés sur les concepts de passivité évoqués ci-dessus seront achevés et constitueront un excellent point de départ vers les réalisations. Il faudra néanmoins travailler encore sur ces projets si l'on veut qu'ils intéressent l'investisseur, soit du point de vue technique, soit sur le plan de l'homologation.

Il faut prévoir une annexe à ce programme — qui en serait le troisième volet — pour amener le projet au point où il deviendra véritablement une option viable qui aura prouvé son aptitude à répondre aux besoins des exploi-



tants et des autorités réglementaires ainsi qu'aux exigences du public, et dans laquelle les compagnies d'électricité peuvent investir en toute confiance.

Orientations futures

L'Institut de recherche sur l'énergie électrique et le Département de l'énergie travaillent ensemble à cette dernière phase de l'opération. Le Département de l'énergie prépare activement l'homologation des projets, en comptant sur la participation financière de l'industrie. De leur côté, l'Institut et le comité directeur organisent un groupement international d'exploitants qui apporteront leur appui concerté à l'étude et à la réalisation des projets définitifs. Cet effort de coordination vise à amener les projets conceptuels au stade où ils justifieront l'investissement. Plus spécifiquement, ce troisième volet doit donner les résultats suivants :

- un ensemble bien compris et cohérent de normes réglementaires confirmé par l'acceptation, par la Commission de réglementation nucléaire, d'un ou plusieurs projets de réacteur passif;