

- un document approuvé par les exploitants et avalisé par la Commission de réglementation nucléaire exposant les desiderata de conception des compagnies d'électricité des Etats-Unis et des autres pays;
- des plans détaillés montrant qu'il est possible de construire ce genre de centrales en trois ans, comme prévu;
- des évaluations probabilistes du risque et des analyses d'accident prouvant que les dispositions nécessaires pour prévenir les accidents ou en atténuer les effets ont été prises;
- définition précise de l'interface homme-machine à l'aide d'analyses fonctionnelles des tâches.

A ce dernier stade, les exploitants apporteront une contribution financière et technique directe aux études.

L'Institut de recherche sur l'énergie électrique et les participants au programme s'occupent actuellement d'organiser cette importante phase des travaux. Des dispositions sont actuellement prises pour la coordonner étroitement avec un grand programme patronné par le Département de l'énergie visant à faciliter l'homologation des plans de centrales et l'on note de part et d'autre l'enthousiasme, le dynamisme et les grands espoirs que fait naître cette prochaine et dernière étape.

Pour conclure, nous pouvons dire que des spécialistes du monde entier contribuent activement à l'étude des spécifications et de la conception d'un réacteur avancé à eau légère, qui se veut techniquement plus simple et économiquement plus avantageux que les installations en service. Il faut espérer qu'il pourra donner un nouvel essor aux programmes nucléo-énergétiques, tant aux Etats-Unis que dans le reste du monde.

La nouvelle génération de réacteurs à eau légère

Améliorations attendues et tendances générales

par P.-J. Meyer et W. Grüner

Les réacteurs nucléaires ont réussi à se tailler une part appréciable du marché mondial de l'électricité puisqu'en 1988 ils ont assuré quelque 17% du total de la production. Sur les 429 centrales nucléaires en service de par le monde à la fin de 1988, 320 étaient dotées de réacteurs à eau légère (LWR), d'une puissance totale légèrement supérieure à 263 gigawatts-électriques (GWe), soit environ 85% du total de la puissance nucléaire installée actuelle qui est de l'ordre de 311 GWe. Sur les 105 centrales nucléaires en construction, 79 sont dotées de réacteurs à eau légère. Ces chiffres montrent clairement que ces réacteurs, tant à eau sous pression qu'à eau bouillante (PWR et BWR), assurent, de nos jours, le plus gros de l'énergie électrique d'origine nucléaire. C'est parce que ces réacteurs ont fait la preuve de leur grande fiabilité et de leur rentabilité que des pays comme les Etats-Unis d'Amérique, l'URSS, la France, la République fédérale d'Allemagne, le Japon, la République de Corée et de nombreux autres encore ont retenu cette filière.

Cette situation fait qu'aujourd'hui on a accumulé une expérience de plusieurs milliers d'années d'exploitation sur laquelle on peut s'appuyer pour perfectionner encore ces équipements. En l'occurrence, les efforts portent sur des perfectionnements à apporter aux modèles actuels afin de simplifier la conception des systèmes, d'en réduire les délais de construction, d'en faciliter la maintenance, d'optimiser la conception du cœur, d'améliorer les modalités d'exploitation et la fiabilité et, en outre, de réduire les coûts de construction, de combustible, d'exploitation et d'entretien. Aux Etats-Unis, de nouveaux modèles de grands réacteurs (1200 MWe) de type dit évolutif et de petits réacteurs (600 MWe) dotés de systèmes passifs de sûreté, dont les clauses techniques tiennent compte d'objectifs économiques spécifiés par l'Institut de recherches sur l'énergie électrique (EPRI) après plusieurs années de collaboration entre les fabricants et les compagnies exploitantes, sont actuellement à l'étude.

Les programmes de perfectionnement du matériel, qu'ils portent sur la conception, la construction ou

M. Meyer et M. Grüner sont respectivement directeur adjoint et directeur principal du Groupe Siemens AG KWU à Erlangen (République fédérale d'Allemagne).



l'exploitation font, pour la plupart, appel à des techniques éprouvées qui permettent aux exploitants et aux autorités compétentes d'accorder les autorisations voulues pour cette nouvelle génération de réacteurs à eau légère. Même les petits réacteurs conçus conformément aux prescriptions de l'EPRI font appel à des systèmes et à des composants qui existent déjà dans d'autres centrales. La majorité des prescriptions de l'EPRI ont trait à des difficultés rencontrées dans les domaines de la planification, de la construction et de l'exploitation.

Caractéristiques des centrales actuelles

Pour pouvoir porter une appréciation sur les propositions relatives à une nouvelle génération de centrales compte tenu de ce que sont les centrales actuelles, il faut fixer des normes de référence par rapport auxquelles on puisse juger dans quelle mesure la sûreté et la compétitivité des nouvelles centrales constituent une innovation ou un progrès.

Les fabricants faisant valoir que les nouveaux modèles sont plus faciles à construire et à exploiter et qu'ils offrent une plus grande sûreté, il est tout naturel que, comme pour tout produit présenté sur le marché, on s'assure qu'ils sont bien dotés des derniers perfectionnements intervenus dans ces domaines. Nous précisons à l'aide d'exemples pris dans les centrales Convoy, récemment mises en service en République fédérale d'Allemagne, où en est l'état de la technique. Les trois centrales Convoy (réacteurs à eau sous pression de 1300 MWe) récemment raccordées au réseau ont toutes été livrées sans dépassement du budget initial avec en moyenne 4 mois d'avance sur le calendrier prévu. On voit donc que les mesures prises pour maintenir l'exécution des travaux dans les délais fixés ont été particulièrement efficaces alors même que l'opinion publique s'opposait de plus en plus au nucléaire. Si l'on exclut des interruptions exceptionnelles telles qu'une suspension des travaux ordonnée par un tribunal, il semble qu'il devrait être facile de construire une centrale de 1300 MWe en 4 ans et demi. Il serait théoriquement possible de construire des centrales plus petites nécessitant moins d'équipements et moins de béton en un peu moins de temps.

Pour parvenir à d'aussi courts délais d'exécution, que l'on a pu également observer en France et au Japon pour des centrales identiques ou analogues, il faut procéder à une normalisation très poussée d'éléments relativement courants mais nécessitant de gros capitaux et une nombreuse main-d'œuvre, tels que vannes, canalisations, supports, ancrages et échelles à câbles. Ces composants employés en grandes quantités dans les centrales nucléaires et qui doivent satisfaire à des normes de qualité très strictes ont été ramenés à un nombre réduit de types de dimensions et de combinaisons possibles. Leur assemblage a été assuré à l'aide de bases de données informatisées qui ont permis d'établir de manière cohérente et très complète la totalité des documents nécessaires aux achats, à la fabrication, au montage et au contrôle de la qualité.

Une bonne exploitation suppose que la centrale puisse fonctionner sans interruption lors des transitoires tant internes qu'externes, qu'elle ait une souplesse suffisante

pour suivre les variations de la demande et que les périodes nécessaires aux révisions soient suffisamment courtes. Au cours des huit dernières années, la fréquence des arrêts non programmés a été de l'ordre de un par année de réacteur. Un système de commande spécial permet de moduler automatiquement en fonction de la charge pour tenir compte des conditions particulières au réseau; il ajuste par exemple la puissance produite en fonction des fluctuations de la demande ou des nécessités de régler la fréquence et assure la continuité de la production si une des pompes du circuit primaire de refroidissement est arrêtée. Ledit système, qui est inséré entre le système de commande normal et le système de protection du réacteur, a pour fonction de limiter l'amplitude des transitoires qui dépassent la bande de puissance normale.

On peut attribuer la courte durée des périodes de révision, d'une part aux mesures détaillées prises au préalable par les exploitants et, d'autre part, à un certain nombre de perfectionnements apportés par les fabricants à la conception de la centrale, notamment possibilité d'accéder en cours d'exploitation à l'enceinte de confinement, aménagement de la piscine de désactivation à l'intérieur de l'enceinte de confinement, réduction considérable du nombre des soudures à inspecter en service et équipements très élaborés d'inspection et de maintenance.

Les réacteurs à eau actuellement en service sont déjà dotés de dispositifs passifs de sûreté et l'on s'attache toujours davantage à appliquer les principes de sûreté passive dans la conception des nouveaux réacteurs. Il n'en reste pas moins que, pour chaque réacteur, il faut une combinaison de dispositifs de sûreté intrinsèque et de dispositifs tant actifs que passifs si l'on veut avoir des normes de sûreté élevées et assurer une défense en profondeur contre tous les événements concevables. Les diverses parties de ces éléments de sûreté peuvent être différentes selon les modèles, certains faisant plus largement appel à des mesures passives.

En matière de sûreté, la possibilité d'obtenir les autorisations nécessaires étant une considération importante, on est fondé à poursuivre pas à pas la recherche d'améliorations à apporter à des modèles déjà autorisés et qui ont vraiment fait leurs preuves. L'obtention de licences pour de nouveaux systèmes de sûreté révolutionnaires dépend beaucoup du climat politique qui règne en la matière dans les divers pays intéressés et est subordonnée à la reconnaissance que tous les dispositifs de sûreté satisfont aux règlements établis.

Ce que l'on attend des futures centrales

Les perspectives qui s'offrent pour les modèles futurs de réacteurs varient considérablement d'un pays à l'autre. En France et en République fédérale d'Allemagne, des techniques très normalisées, sûres et éprouvées ont été mises au point et les résultats d'exploitation sont excellents.

Conservant les techniques employées pour les centrales Convoy, la République fédérale d'Allemagne étudie déjà les perfectionnements à apporter à la prochaine génération de réacteurs à eau sous pression. Electricité de France (EDF) adoptera le même principe pour son

programme évolutif qui permettra d'améliorer encore la conception, sans que des modifications majeures soient nécessaires. Pour les futurs modèles de réacteurs à eau sous pression français qui entreront en service à partir de l'an 2000, l'EDF a entrepris une étude appelée "REP-2000". Ses objectifs sont les suivants: capacité de suivre les variations de la charge, rentabilité, souplesse d'exploitation. Pour assurer une meilleure utilisation du combustible dans les PWR, les trois partenaires français (Commissariat à l'énergie atomique, EDF et Framatome) ont entrepris un programme commun afin d'étudier s'il est possible de réaliser un réacteur convertible à variation de spectre (RCVS). On ne compte guère réaliser un tel réacteur avant l'année 2002 ou 2005 et aucune étude détaillée de conception ne sera entreprise avant les premières années 90.

Au Japon, l'étude de grands réacteurs tant à eau sous pression qu'à eau bouillante de type avancé est en bonne voie. Mitsubishi-Westinghouse se chargeant du réacteur à eau sous pression et Hitachi-Toshiba-General Electric du réacteur à eau bouillante. Ce dernier a été retenu par la Compagnie d'électricité de Tokyo pour les deux prochaines tranches de la centrale de Kashiwazaki-Kariwa. La réalisation technique de la prochaine génération de réacteurs à eau légère japonais n'interviendra pas avant l'année 2005. Afin de répondre aux futures nécessités sociales et économiques, on veillera pour la nouvelle génération à perfectionner les fonctions des cœurs de réacteurs, notamment en employant des assemblages combustibles MOX, à améliorer le comportement du combustible, à perfectionner la technologie de la sûreté et à renforcer la protection antisismique.

Dans la construction et l'exploitation des centrales nucléaires, les considérations de sûreté ont, dès l'origine, occupé une place de premier plan, qu'elles occupent toujours. A cette fin, on a créé un réseau très serré de contrôle et de surveillance constitué d'organismes réglementaires et d'institutions internationales qui repose sur des ensembles très complets de codes, de règles, et de règlements, arrêtés tant à l'échelon national qu'à l'échelon international. Les mesures de sûreté à appliquer aux centrales nucléaires pour ramener à un niveau acceptable les risques pour la santé et la sécurité de la population sont décidées à l'occasion de procédures d'autorisation laborieuses et très poussées, accompagnées d'auditions publiques et suivies le plus souvent de procès intentés devant des tribunaux administratifs. L'opinion publique, surtout depuis l'accident de Tchernobyl, observe une attitude très réservée envers le nucléaire, les risques qu'elle y associe étant très différents de ce qu'ils sont en réalité.

Il est difficile de déterminer les dispositifs de sûreté qui, pour l'immédiat, feront mieux accepter le nucléaire. Néanmoins, il convient de ne pas perdre de vue les considérations suivantes:

- Il importe que les centrales existantes continuent à bien fonctionner; en effet, l'expérience qu'elles permettent d'acquérir est un élément primordial pour la sûreté des nouvelles centrales.

- Vu la structure d'âge des centrales en service (la moitié environ des centrales nucléaires de la République fédérale d'Allemagne ont moins de dix ans) et vu qu'on étudie actuellement les possibilités de prolonger leur durée de vie, les nouvelles centrales seront appelées à

coexister pendant plusieurs dizaines d'années avec des centrales anciennes et leurs systèmes de sûreté devront être compatibles avec ceux de ces dernières.

- Les nouveaux réacteurs, notamment quand on les installe sur des sites nouveaux, devraient pouvoir maintenir dans les limites du périmètre de la centrale les conséquences d'accidents plus graves que les accidents de référence, ce qui éviterait de devoir prévoir des mesures d'intervention d'urgence pour les parties avoisinantes.

A partir de ces considérations générales, il ne sera pas possible d'établir au seul échelon national des directives plus explicites à l'intention des concepteurs de centrales. De fait, les conséquences de l'accident de Tchernobyl ont permis de mieux faire comprendre que la sûreté nucléaire est bien un problème de caractère international. Les autres progrès en matière de sûreté des centrales devront être coordonnés à l'échelon international. Tel sera certainement le cas après 1992 dans la Communauté économique européenne où les pays devront arrêter, ne serait-ce que pour les effets des centrales nucléaires sur l'environnement, des codes et des normes applicables tant en exploitation normale qu'en situation inhabituelle. On peut s'attendre à ce que les membres de la Communauté qui ne possèdent aucune centrale sur leur territoire tiennent à être consultés à ce propos.

La part qu'occupe le nucléaire sur le marché de l'électricité a pratiquement quadruplé, passant de 10 à 40% au cours des 10 dernières années, ce qui, mieux que tout, prouve la compétitivité du nucléaire en République fédérale d'Allemagne. Il est à prévoir que la situation du marché allemand de l'énergie changera après 1992, la Communauté européenne se proposant d'introduire des mesures de déréglementation et d'éliminer les obstacles qui contrarient les échanges de biens et de services entre pays membres. Il ne sera sans doute pas plus facile que par le passé d'établir des prévisions concernant les prix de l'énergie sur le marché mondial et c'est pourquoi il conviendrait de fixer, pour les coûts de production, un objectif théorique prudent qui se situerait au niveau le plus bas escompté au sein de la Communauté. Il est vraisemblable qu'il corresponde au coût de l'énergie d'origine nucléaire en France où, de longue date déjà, la rationalisation des types de centrales et leur fabrication en série ont beaucoup contribué au volume actuel des exportations d'électricité.

Par ailleurs, certains pays dotés de petits réseaux envisagent également de s'équiper éventuellement en nucléaire. Certains d'entre eux, qui n'ont pas suffisamment de ressources propres, sont obligés d'importer de l'énergie. On pourrait donc les considérer comme des utilisateurs potentiels de petites centrales. Outre que les coûts de production de ces dernières sont faibles, il ne faut pas perdre de vue que les investissements qu'elles nécessitent sont de loin inférieurs à ceux que supposent les grandes centrales. Enfin, l'introduction du nucléaire dans un programme national de développement énergétique entraîne de nombreux effets bénéfiques. La construction des centrales suppose une multitude de tâches industrielles nécessitant l'emploi de nombreux spécialistes et, plus tard, l'exploitation proprement dite implique l'existence de services d'entretien bien équipés et très compétents pour assurer de manière durable le bon fonctionnement des installations.

Tendances futures

Après avoir exposé à l'aide de quelques exemples où en est la technologie des réacteurs à eau légère, nous avons évoqué les domaines où le développement du nucléaire semblait le plus prometteur. Compte tenu des tendances générales que nous venons d'exposer, il conviendra de s'attacher de plus près aux domaines ci-après:

- Pour pouvoir réduire considérablement les délais et les coûts de construction, il faut avoir un jeu normalisé complet de plans et de documents de construction bien avant le début des travaux. Il est très important que les systèmes et les composants soient normalisés et que les études techniques correspondantes, les dessins d'études, les procédures de mise en service et toute la documentation nécessaire soient prêts pour l'ensemble de la centrale.

- Les principales raisons qui incitent à pousser la conception du combustible et du cœur et à apporter des perfectionnements aux méthodes de gestion du combustible découlent des considérations suivantes: 1) il convient de réduire les coûts afférents au cycle du combustible a) en portant le taux de combustion à 45-50 mégawatts-jour par kilogramme d'uranium pour les réacteurs à eau sous pression, et b) en améliorant le rendement de l'uranium grâce à une optimisation de la conception des réacteurs et à l'application de stratégies avancées de gestion du combustible à l'intérieur du cœur; 2) la conception du cœur des réacteurs et des centrales doit assurer une plus grande souplesse d'exploitation de façon à permettre a) de porter à 2 ans le cycle de séjour du combustible; b) de prolonger le temps de séjour en réacteur; c) de tenir pleinement compte des besoins actuels et futurs pour pouvoir assurer le fonctionnement en suivi de charge, avec modulation de 10% par minute sur une plage de puissance étendue; et 3) économiser les ressources d'uranium naturel et encourager le recours aux techniques de retraitement en sorte qu'il soit possible de recycler le plutonium. Les diverses mesures nécessaires pour parvenir à ces fins étant solidaires, il faut évaluer minutieusement l'ensemble de tous les facteurs en cause afin d'en optimiser les interactions.

- Une combinaison et une intégration appropriées permettent déjà d'assurer une surveillance préventive de l'enveloppe de pression du circuit primaire qui porte indépendamment sur les fuites, les vibrations, la fatigue du matériel et les corps migrants. Les renseignements ainsi obtenus permettront d'espacer davantage les opérations de maintenance préventive et assureront une plus grande fiabilité de l'enveloppe de pression.

- Il conviendrait de revoir les marges prévues dans la conception des sécurités compte tenu de la somme de connaissances accumulées à l'occasion des travaux de collaboration en recherche-développement intéressant la sûreté qui ont été menés ces dernières années à l'échelon international entre plusieurs établissements.

- Les résultats ainsi obtenus peuvent s'insérer dans les travaux menés systématiquement sur les procédures de gestion des accidents plus graves que les accidents de

référence. On étudie les possibilités de prolonger le délai théorique, qui est actuellement de 30 minutes, accordé à l'opérateur pour intervenir en cas de transitoire anormal.

- Pour pouvoir assurer la surveillance de la centrale en cas de transitoire et mobiliser les ressources de cette dernière afin de prendre les mesures correctives qui s'imposent, il est indispensable d'avoir des renseignements complets et exacts sur la situation de la centrale. Les progrès accomplis au niveau de l'interface homme-machine l'ont été grâce à un système d'information sur le fonctionnement employé pour la première fois dans les centrales Convoy. Ce système traite et regroupe à l'aide d'un terminal à écran de visualisation interactif tous les renseignements pertinents relatifs aux paramètres de la centrale sous les formes les plus indiquées pour l'opérateur de service. De nouvelles études sont en cours pour assurer la conversion en numérique de l'ensemble du système.

- Une étude minutieuse des possibilités d'introduire des éléments passifs dans les sécurités combinée à des mesures très poussées de simplification devraient faciliter la maintenance, réduire l'exposition aux rayonnements et augmenter la disponibilité des installations.

En ce qui concerne la facilité de construction et d'exploitation, les études porteront surtout sur les moyens de maintenir et de renforcer l'avantage économique de l'électricité d'origine nucléaire malgré les fluctuations du marché de l'énergie. La réduction des délais de construction et l'augmentation de la durée des cycles d'exploitation entre révisions semblent être les domaines les plus prometteurs.

Le marché international

On peut s'attendre à enregistrer au cours des dix prochaines années un accroissement de la production d'électricité aussi bien des grandes que des petites centrales nucléaires. Des études relatives aux sites, à l'homologation et aux réalisations techniques sont en cours dans de nombreux pays, en prévision du moment où les plans d'agrandissement des réseaux électriques exigeront un accroissement de la puissance installée. Pour rationaliser leur politique des ventes, Framatome et Siemens ont récemment décidé de créer une société qui sera chargée de la vente internationale d'une nouvelle centrale nucléaire de leur conception. Au Japon, des fabricants des Etats-Unis et des preneurs de licence japonais poursuivent en commun l'étude de types avancés de réacteurs tant à eau sous pression qu'à eau bouillante.

Pour le moment, le marché international connaît une période de stagnation, car le profil de croissance de la demande dans la plupart des pays industriels ne semble guère devoir se modifier dans l'immédiat. En revanche, les pays en développement où les taux de croissance de la demande sont élevés, ou appelés à le devenir, n'ont pas les moyens de financer des centrales nucléaires ou ont des budgets insuffisants pour les prochaines années. Pour assurer le développement du nucléaire, il ne s'agit donc pas tant de résoudre des problèmes techniques que de trouver de meilleurs moyens de financement.

