

Energie d'origine nucléaire: Questions et réponses

Un groupe international d'experts étudie la sûreté des centrales nucléaires

En 1988, l'Institut de l'uranium de Londres — association internationale d'entreprises industrielles du secteur nucléaire — a publié un rapport intitulé "The Safety of Nuclear Power Plants"*. Ce rapport, fondé sur les travaux d'un groupe international d'experts nucléaires de huit pays, expose pour le profane les principes fondamentaux de la sûreté des réacteurs, la façon dont ils sont appliqués et ce qui en résulte**. Les questions et réponses présentées ici sont tirées de ce rapport; elles ne concernent qu'un certain nombre des problèmes traités plus en détail dans le rapport lui-même.

1. Les mêmes normes s'appliquent-elles dans tous les pays?

Les normes de sûreté ont pour objet de protéger le public et le personnel des centrales nucléaires contre les risques que peut présenter l'exploitation de ces installations. Ces normes ne sont pas essentiellement différentes d'un pays à l'autre, mais leur application peut varier dans le détail selon le climat législatif et réglementaire des divers pays.

Au cours des dix dernières années, l'AIEA a publié une soixantaine de codes et guides au titre de son programme de normes de sûreté nucléaire, connu sous le nom de «programme NUSS» (Nuclear Safety Standards). Ces normes sont fondées sur l'expérience et les pratiques nationales et soumises à l'approbation du Conseil des gouverneurs de l'AIEA avant leur publication. Les cinq codes de bonne pratique traitent des questions suivantes:

* Pour tous renseignements complémentaires au sujet de ce rapport, s'adresser à l'Institut de l'uranium, Bowater Houser House, 68 Knightsbridge, Londres, SW1X 7LT, Royaume-Uni.

** Le rapport présente les opinions du groupe sur les niveaux de sûreté obtenus dans les centrales nucléaires du monde occidental bien connues des experts. Il se peut que nombre de considérations soient également valables pour les réacteurs d'autres parties du monde, lesquels ne relèvent normalement pas de cette étude, sauf dans les cas spécifiés.

- organisation gouvernementale pour la réglementation en matière de sûreté des centrales nucléaires;
- sûreté en matière de choix des sites de centrales nucléaires;
- conception pour la sûreté des centrales nucléaires;
- sûreté de l'exploitation des centrales nucléaires;
- assurance de la qualité pour la sûreté des centrales nucléaires.

Quant aux guides de sûreté, ils ont pour objet d'exposer les méthodes permettant d'appliquer les normes énoncées dans les codes*.

Dans chaque pays il existe des lois et règlements visant à protéger le public et les travailleurs de l'industrie nucléaire contre les effets des rayonnements en période d'exploitation normale des installations. Ces lois et règlements varient quelque peu selon les pays, mais demeurent dans l'ensemble conformes aux recommandations formulées par la Commission internationale de protection radiologique (CIPR) dans sa publication n° 26 (1977) relative aux niveaux acceptables de radioexposition.

2. Les procédures d'homologation sont-elles différentes selon les pays et en résulte-t-il différents degrés de sûreté?

Les modalités d'autorisation d'exploiter et les dispositions relatives aux inspections appliquées aux fins de la sûreté nucléaire dans un certain nombre de pays ont de nombreux points communs. Dans chacun de ces pays, des organismes d'Etat sont chargés des questions d'énergie atomique et de la protection du public contre les rayonnements ionisants.

Avant de mettre une centrale nucléaire en chantier, il faut mettre au point toute une série de procédures assez

* Voir, par exemple, *Les principes généraux de sûreté dans la conception des centrales nucléaires*, Guide de sûreté n° 50-SG-D11 de la Collection Sécurité, AIEA, Vienne, 1986.

complexes afin de s'assurer que la conception de l'installation est bonne et bien étudiée sous tous ses aspects et que le site choisi est approprié. Un rapport de sûreté, préalable à la mise en chantier, est exigé. La demande d'homologation est passée au crible par le service compétent du ministère responsable et par des groupes consultatifs d'experts indépendants réunis à cet effet.

Les services d'homologation et les organismes réglementaires de chaque pays surveillent la construction de la centrale ainsi que la fabrication de ses divers composants, et notamment l'assurance de la qualité, afin de garantir le respect intégral des normes de sûreté. Les exigences sont extrêmes et les spécifications techniques des composants essentiellement nucléaires ou concernant la sûreté sont plus rigoureuses que dans les autres branches de l'industrie. En particulier, les codes et règlements concernant l'étude et la réalisation des composants sous pression destinés à des applications nucléaires ont fait l'objet d'une normalisation très poussée au niveau international. Une fois construite, la centrale doit être réceptionnée en bonne et due forme avant la délivrance de l'autorisation d'exploiter et le personnel technique ne peut la mettre en service qu'après avoir reçu la formation nécessaire. Dans chaque pays, il existe un corps d'inspecteurs nucléaires chargés de contrôler sur place la conduite de l'exploitation.

Le contrôle et la surveillance de tous les stades de la construction, de la mise en service et de l'exploitation, conditions premières de la sûreté d'une centrale, sont donc universellement pratiqués.

3. Est-il prudent d'utiliser un fluide de refroidissement sous pression? Les cuves de réacteurs sont-elles sûres?

Un fluide caloporteur sous pression ne présente aucun risque si la cuve du réacteur est bien conçue. Or, la technologie en cause n'a plus de secret et n'est pas nouvelle, car elle date de bien avant la mise en exploitation de l'énergie nucléaire.

Dans tous les réacteurs refroidis à l'eau ou par un gaz, le fluide caloporteur circule sous une pression supérieure à la pression atmosphérique, ce qui est nécessaire pour assurer la refroidissement du cœur aux niveaux élevés de puissance et de température qui permettent de produire de la vapeur ayant les caractéristiques requises pour actionner des turbines. La pression de travail est d'environ 20 bars dans un réacteur à gaz et peut atteindre 160 bars dans un réacteur à eau.

La cuve, les générateurs de vapeur, les pompes principales du circuit de refroidissement, le pressuriseur et les conduites de raccordement constituent l'enveloppe hermétique primaire du réacteur. Dans la plupart des réacteurs à eau bouillante ou refroidis par un gaz, la cuve est le seul composant de grande taille qui doit supporter la pression du circuit primaire. Le premier souci technique du constructeur doit donc être de fabriquer une cuve capable de résister aux pressions spécifiées. Les qualités inhérentes du circuit qui garantissent son intégrité sont résumées ci-après.

L'intégrité d'une cuve en acier dépend des trois principaux paramètres suivants:

- les contraintes exercées sur les parois;
- la résistance du matériau;
- la taille des défauts de ce matériau.

Si les contraintes ne sont pas excessives, si le matériau est suffisamment résistant et ses défauts relativement insignifiants, il est certain que la cuve ne se détériorera pas. Tant que les contraintes et la résistance du matériau se maintiennent dans certaines limites, même l'aggravation d'un défaut ou l'apparition d'une fissure ne pourraient provoquer l'éclatement de la cuve, car il se produirait d'abord une fuite qui réduirait la pression bien avant que l'accident ne puisse se produire.

Si ces paramètres peuvent être maintenus dans les limites spécifiées, tant aux stades de la fabrication et de la construction que pendant la durée utile du réacteur, une défaillance grave du circuit primaire est pratiquement exclue.

4. Comment réalise-t-on une cuve de réacteur?

En respectant les normes techniques traditionnelles et en procédant à l'analyse et à l'essai des matériaux et de la validité de ces normes.

Lors de l'étude d'une cuve de réacteur, on cherche par tous les moyens à réduire au minimum les contraintes que le matériel aura à subir en cours d'exploitation et à éviter leur concentration*. On prend particulièrement soin de prévenir les contraintes thermiques pouvant résulter de variations anormales de la température. Pour s'assurer de l'exactitude des calculs, on soumet les plans à une expertise indépendante. De plus, les contraintes sont systématiquement mesurées aux points critiques pendant les essais sous pression des divers composants.

Au cours des dernières années, l'analyse théorique des contraintes statiques et dynamiques et des déformations des cuves en acier épais ainsi que l'expérience pratique acquise en cours d'exploitation ont permis de traiter la question à fond. On peut donc être assuré que tous les cas possibles de contraintes et de déformations — et ils sont innombrables — ont été étudiés et résolus. La marge de sécurité prévue rend la probabilité d'une défaillance extrêmement faible.

La résistance du matériau doit demeurer inchangée sur toute l'étendue de la gamme des températures de travail et sous irradiation, ce qui signifie que le matériau de base** doit être spécialement adapté et que le forgeage, le soudage et le traitement thermique doivent être exécutés avec le plus grand soin et sous contrôle technique. Toutes les opérations de fabrication répondent à des spécifications très strictes et sont surveillées. Après chaque opération, de nombreuses éprouvettes sont prélevées en différents points du matériau et à diverses profondeurs pour s'assurer que ses propriétés sont homogènes et demeurent dans les limites spécifiées.

* Généralement due à un changement brusque de structure, au niveau d'orifices par exemple, cette concentration peut provoquer des contraintes plusieurs fois supérieures à ce qu'elles seraient normalement.

** Matériau constitutif de la paroi de la cuve appelée à supporter la pression.

Divers types de réacteurs

Le principe de tous les réacteurs est d'entretenir une réaction nucléaire en chaîne pour produire de la chaleur servant à porter de l'eau à ébullition. La vapeur ainsi obtenue est utilisée de la même façon que dans les centrales chauffées au charbon, au mazout ou au gaz, c'est-à-dire qu'elle actionne des turbo-alternateurs produisant de l'électricité. La fission en chaîne des noyaux des atomes libère de l'énergie dans la masse du combustible nucléaire. Elle fractionne le noyau en plusieurs fragments qui forment de nouveaux noyaux — les produits de fission; il y a dégagement de chaleur et émission de neutrons, lesquels provoquent à leur tour de nouvelles fissions. Les réacteurs thermiques comportent un modérateur qui a pour effet de ralentir les neutrons de fission afin de faciliter leur capture par les noyaux fissiles d'uranium 235. Ce modérateur est le plus souvent de l'eau ordinaire, mais on utilise aussi le graphite et le deutérium, isotope de l'hydrogène, ce dernier sous forme d'eau lourde, son oxyde. (L'eau ordinaire, dite légère, est essentiellement constituée d'oxyde d'hydrogène et ne contient qu'une faible proportion d'eau lourde.) La chaleur est extraite du cœur du réacteur par un fluide caloporteur qui produit directement ou indirectement de la vapeur pour les turbines et assure le refroidissement du cœur. Les barres de commande en acier au bore ou au cadmium, deux absorbeurs de neutrons, coulissent dans des canaux ménagés dans le cœur du réacteur où elles sont introduites plus ou moins profondément de façon à régler avec

précision l'intensité de la réaction. Chaque modèle de réacteur est équipé de systèmes et de dispositifs de sûreté qui lui sont propres, mais dont les principes sont les mêmes.

Si l'on utilise de l'eau sous pression ou de l'eau bouillante, on obtient une puissance volumique élevée et, en prévoyant un combustible légèrement enrichi, il est possible de réaliser un réacteur de grande puissance dans une cuve de dimensions réduites. Il faut néanmoins que le fluide de refroidissement primaire soit maintenu à haute pression pour que les températures et les pressions de travail de la vapeur soient suffisantes pour les besoins des turbo-alternateurs. La sûreté d'un réacteur refroidi à l'eau dépend donc de l'intégrité de son circuit primaire.

Dans un réacteur à eau sous pression (REP), le circuit primaire de refroidissement et le circuit secondaire, alimenté en eau pour produire la vapeur, sont indépendants, de sorte que celle-ci n'est pas radioactive, ce qui permet d'utiliser les turbo-alternateurs dans les mêmes conditions que ceux d'une centrale thermique classique.

On peut construire des réacteurs de ce type fonctionnant à l'uranium naturel (non enrichi), mais il faut alors augmenter le volume du cœur et utiliser de l'eau lourde comme modérateur et fluide de refroidissement primaire. Ces réacteurs peuvent comporter soit une cuve sous pression comme les réacteurs à eau légère sous pression, soit un réseau de tubes de force dans lequel circule le fluide de refroidissement et qui constitue l'enveloppe étanche

Type de réacteur	Combustible	Modérateur	Fluide caloporteur et pression approximative en bars (1 bar correspond à peu près à 1 atmosphère)	Production de vapeur
REP	Bioxyde d'uranium (approx. 3,2% ²³⁵ U)	Eau ordinaire	Eau ordinaire sous pression (160 bars)	Circuit indépendant
CANDU	Bioxyde d'uranium enrichi (0,7% ²³⁵ U)	Eau lourde	Eau lourde pompée sous pression (90 bars)	Circuit indépendant
REB	Bioxyde d'uranium (2,6% ²³⁵ U)	Eau ordinaire	Eau ordinaire bouillante sous pression dont la vapeur est directement utilisée (70 bars)	
Magnox	Uranium naturel (0,7% ²³⁵ U)	Graphite	Anhydride carbonique (20 bars)	Circuit indépendant
RAG	Bioxyde d'uranium (2,3% ²³⁵ U)	Graphite	Anhydride carbonique (40 bars)	Circuit indépendant
RBMK	Bioxyde d'uranium (2,0% ²³⁵ U; passant à 2,4% en 1988)	Graphite	Eau ordinaire bouillante sous pression dont la vapeur est directement utilisée (70 bars)	

5. Comment peut-on prévoir et éviter la fragilisation de l'acier?

Le comportement de la cuve d'un réacteur sous irradiation est surveillé de près pendant le fonctionnement de la centrale, bien que l'on ait acquis une vaste expérience du phénomène avec les diverses qualités d'acier normalisé qui sont universellement utilisées. Pour savoir suffisamment à l'avance dans quelle mesure la résistance de l'acier d'une cuve peut faiblir sous l'effet de l'irradiation par les neutrons, des échantillons

du métal de base et des soudures sont soumis à un flux de neutrons plus intense que celui auquel la paroi de la cuve sera exposée. L'analyse destructive de ces éprouvettes permet de prédire le comportement futur de la cuve sous irradiation pendant sa durée utile et de vérifier que sa résistance est bien conforme aux codes et spécifications initiaux. On peut donc raisonnablement exclure la possibilité que les matériaux dont sont faits les composants sous pression acquièrent en cours d'usage des propriétés insoupçonnées susceptibles de provoquer leur défaillance.

primaire du cœur du réacteur. C'est cette dernière configuration qui est utilisée dans les réacteurs du type CANDU.

Dans un réacteur à eau bouillante (REB), l'eau du circuit primaire de refroidissement s'évapore en partie dans le cœur même du réacteur et la vapeur ainsi produite alimente directement les turbo-alternateurs. La pression est moindre que dans les réacteurs à eau sous pression. Il faut cependant prendre certaines précautions, car il existe une légère contamination radioactive au niveau des turbines, sans que cela nuise d'ailleurs à l'exploitation ni à la maintenance.

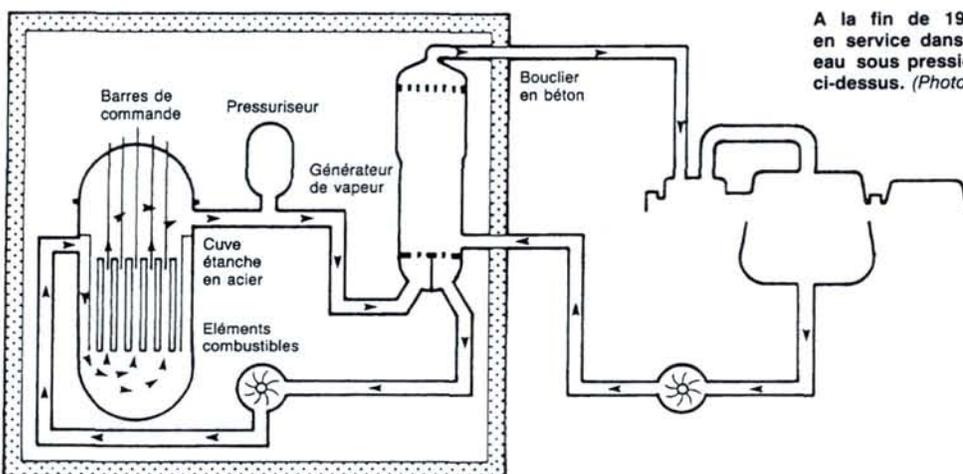
Le réacteur dit Magnox consomme de l'uranium naturel. Il est refroidi à l'anhydride carbonique sous faible pression, mais il produit une vapeur de bon rendement thermique. Le cœur est assez développé et de faible puissance volumique, de sorte que la cuve, qui assure en outre le confinement, est elle aussi de grandes dimensions (les premiers réacteurs Magnox étaient équipés d'une cuve en acier tandis que les modèles ultérieurs comportent un caisson en béton précontraint contenant les échangeurs de chaleur).

Le réacteur avancé refroidi par gaz (RAG) consomme un combustible à l'oxyde d'uranium légèrement enrichi. Il est, lui aussi, refroidi à l'anhydride carbonique, mais cette fois sous haute pression, et le transfert de chaleur est amélioré. La puissance volumique est plus élevée de sorte que le réacteur peut être de moindres dimensions tout en étant plus puissant. Le caisson étanche est extrêmement fiable et sert aussi de confinement.

Le réacteur soviétique RBMK-1000 à eau bouillante, modéré au graphite et équipé d'un circuit de refroidissement à tubes de force, est une combinaison de plusieurs

systèmes. Son principal avantage est que l'on peut réaliser des unités de grande puissance sans qu'il soit besoin de prévoir un caisson étanche massif et de grande taille, comme c'est le cas pour les réacteurs à eau sous pression ou à eau bouillante, ni une cuve à calandre de configuration compliquée pour contenir le modérateur, comme c'est le cas pour le réacteur CANDU. Pour pouvoir utiliser du combustible faiblement enrichi tout en renonçant à l'eau lourde, c'est le graphite qui est utilisé comme modérateur.

Quel que soit le type de réacteur, ce n'est pas la sûreté des diverses fonctions prises séparément qu'il faut considérer, mais celle de tous les éléments solidaires du système; il n'en reste pas moins vrai que chaque partie a une influence sur le tout. A faible puissance volumique, les montées de température sont lentes; à puissance volumique plus élevée, l'extraction de la chaleur doit avoir un meilleur rendement. Une baisse de pression est moins grave dans un réacteur refroidi par un gaz que dans un réacteur refroidi à l'eau, car il ne peut y avoir de changement brusque de phase. Par ailleurs, les divers modérateurs utilisés n'ont pas le même coefficient d'absorption de la chaleur. Tous les réacteurs n'ont pas non plus le même coefficient de puissance (variation globale de la radioactivité en fonction de tous les facteurs qui peuvent l'affecter). La plupart des réacteurs ont des coefficients de puissance négatifs de sorte que les montées en puissance sont spontanément autorégulées mais, si le coefficient est positif, il faut que les barres de commande puissent intervenir rapidement. Les confinements peuvent être de divers types, pourvu qu'ils puissent remplir leur fonction essentielle, c'est-à-dire empêcher le dégagement de matières radioactives.



A la fin de 1987, 225 des 417 réacteurs en service dans le monde étaient du type à eau sous pression correspondant au schéma ci-dessus. (Photo: UKAEA)

6. Est-il possible de fabriquer une cuve de réacteur qui ne présente aucun défaut?

C'est peu probable; toutefois, les fissures et autres défauts des composants sous pression doivent être considérés avec réalisme afin de ne pas surestimer leurs effets. Ils ont un point critique.

Les petits défauts sont sans importance, tandis que les défauts plus conséquents risquent de causer la dégradation de la paroi dans certaines conditions d'exploitation.

Les défauts de fabrication sont décelés et analysés en

cours même de fabrication. Les seuls défauts dont il faut se soucier sont ceux qui se développent avec les cycles fonctionnels successifs du composant (dont le nombre pendant la durée utile de la centrale est limité). Cela dit, pour qu'un défaut non détecté au stade de la fabrication ne le soit pas par la suite avant de causer des problèmes, il faudrait qu'il atteigne très vite son point critique. Or, les méthodes actuelles d'essai non destructif permettent de détecter dans les parois épaisses des cuves des défauts de l'ordre du cinquantième de leur taille critique, ce qui assure une grande marge de sécurité.

Les résultats d'études techniques poussées montrent qu'entre les défauts détectables et ceux de taille critique il existe une série de dimensions intermédiaires de fissures accompagnées de fuites, lesquelles sont l'indice visible de l'aggravation du défaut avant même que celui-ci n'atteigne son point critique. Outre cet indice, on recherche continuellement, en cours d'exploitation, les fissures et autres défauts en évolution.

Même en l'absence de cette surveillance, on pourrait exclure l'existence d'un défaut ou d'une fissure critique en période d'exploitation, car des essais sous pression hydraulique à froid sont pratiqués avant la mise en service de l'installation et périodiquement par la suite. Dans les conditions de ces essais, la dimension critique du défaut se trouve réduite à environ la moitié de ce qu'elle serait dans les conditions d'exploitation, de sorte que la défaillance a toutes les chances de se produire pendant l'essai et non sous l'effet des hautes températures de travail.

Les petites fissures et imperfections se situent généralement au voisinage des soudures. Pour limiter le nombre et la longueur de ces dernières et réduire les contraintes qui s'y exercent, on fabrique aujourd'hui les cuves en assemblant plusieurs sections circulaires forgées d'une seule pièce et jointes ensuite par une soudure périphérique.

Les composants du circuit primaire sont soumis à des essais non destructifs très complets et minutieux pendant leur fabrication et lors des vérifications en cours d'exploitation. La plupart de ces essais se font à l'aide de détecteurs aux ultrasons, manuels ou automatiques, avec interprétation du signal par l'opérateur ou par un dispositif automatique. Les méthodes sont conçues de façon à minimiser les risques de négligence humaine et comportent un enregistrement des résultats qui permet, en répétant l'opération, de faire une analyse indépendante qui ne dépend pas du jugement d'un seul inspecteur.

Comme l'évolution d'une fissure sous l'effet de la corrosion ou de la fatigue du métal est seulement de l'ordre de 1/10 mm par an, toute fissure est détectable bien avant qu'elle n'atteigne sa dimension critique dans les conditions d'exploitation en régimes de puissance et de température élevés. On peut donc raisonnablement écarter l'éventualité qu'une fissure évolue de façon critique sans avoir été détectée au cours des essais à froid.

7. Peut-on exclure la défaillance d'une cuve de réacteur?

On a recours à plusieurs méthodes indépendantes pour garantir l'intégrité d'une cuve et des conduites; aussi peut-on considérer l'enveloppe étanche du système comme intrinsèquement sûre. Ces méthodes sont les suivantes:

- conception soignée et analyse approfondie et confirmée des contraintes;
- protection fiable contre les surpressions;
- emploi de matériaux extrêmement résistants;
- limitation de la radiofragilisation;
- élimination des défauts par des procédés de fabrication appropriés;

- essais non destructifs en cours de fabrication et d'exploitation.

Ces mesures sont complétées par les opérations suivantes:

- essais hydrauliques à froid;
- détection des fuites.

Toutes ces précautions permettent de garantir l'intégrité de la cuve et du circuit primaire dans toutes les conditions d'exploitation normales et anormales concevables.

8. Comment peut-on prévenir l'erreur humaine en cours d'exploitation?

Les accidents sont dus en grande partie non à des pannes de matériel mais à des erreurs, défaillances ou négligences humaines associées à des conditions d'exploitation ou à des caractéristiques de conception qui ne tiennent pas suffisamment compte du facteur humain. Cela est vrai de toutes les activités pour lesquelles on emploie des machines ou des outils, qu'il s'agisse du transport et de la circulation, des procédés industriels de fabrication, du bricolage ou des loisirs.

L'erreur humaine et les fausses manœuvres sont les causes principales des accidents de Three Mile Island, en 1979, et de Tchernobyl, en 1986. Un défaut de conception a été le principal responsable de ce dernier, car la sûreté supposait que les opérateurs ne commettent pas certaines erreurs.

L'erreur, la défaillance ou la négligence sont aussi en partie à l'origine d'autres accidents nucléaires de moindre importance; par exemple, certains transitoires non prévus (variations de puissance du réacteur) auraient pu être corrigés à temps si les opérateurs avaient réagi comme il le fallait ou si le système avait été conçu de façon à prévenir les fausses manœuvres. La sûreté d'exploitation et la correction des anomalies pouvant donner lieu à des incidents doivent être garanties en dépit de l'imperfection humaine.

L'expérience professionnelle, la formation et le perfectionnement des opérateurs de centrales nucléaires sont d'un niveau au moins aussi élevé que pour les pilotes de ligne des meilleures compagnies. Malgré la complexité des centrales nucléaires, leurs opérateurs ont sur les pilotes l'avantage de disposer de beaucoup plus de temps pour réagir et d'avoir toujours la ressource de mettre le réacteur à l'arrêt pour maîtriser un transitoire dangereux, tandis que le pilote, lui, ne peut pas poser son avion n'importe quand.

Pour exclure l'erreur humaine, on a automatisé la plupart des opérations, y compris la régulation de la puissance du réacteur. La tâche essentielle des opérateurs consiste à surveiller et à corriger le fonctionnement des systèmes automatiques et à conduire les opérations conformément aux instructions précises du manuel d'exploitation. Quand la sûreté est en cause, il suffit que l'opérateur ait appuyé sur le mauvais bouton pour que les dispositifs interconnectés se déclenchent et rétablissent la situation. Tous les paramètres de travail importants et toutes les instructions de commande des différents organes sont enregistrés en continu et contrôlés par les ordinateurs et les systèmes d'alarme. *Le pire auquel on puisse s'attendre après une intervention manuelle erronée est une réduction automatique de*

la puissance du réacteur ou son arrêt total; c'est parfois gênant, mais jamais dangereux.

En revanche, l'erreur ou la négligence humaines au moment où se produit un transitoire inattendu peut avoir des effets beaucoup plus graves qu'une simple interruption de disponibilité opérationnelle. S'il est vrai que ces transitoires prennent quand même quelques minutes pour se développer, les opérateurs ont besoin d'un certain temps pour analyser la situation, déterminer la nature de l'incident et décider des mesures à prendre, et cela dans un état de tension nerveuse. Il faut donc éviter de devoir compter sur leur réaction, aussi pertinente et rapide soit-elle, lorsqu'il s'agit d'intervenir immédiatement pour maîtriser un transitoire imprévu et minimiser ses conséquences.

C'est pourquoi les systèmes de sûreté sont mis en commande automatique au moins pendant le premier quart d'heure après le démarrage, ce qui garantit la normalité et satisfait aux exigences fondamentales de la sûreté. Pour aider les opérateurs à prendre par la suite des initiatives pertinentes, il existe un suivi continu des opérations qui permet de déterminer rapidement la nature du transitoire dangereux, ainsi que son origine et son évolution.

On généralise l'emploi des systèmes de diagnostic informatisés pour faciliter la détection des anomalies et permettre aux opérateurs d'agir en toute connaissance de cause. L'automatisation des fonctions de sûreté et les moyens informatiques modernes contribuent aussi, bien entendu, au bon fonctionnement et à la fiabilité d'une centrale.

9. Comment peut-on éviter l'erreur humaine au stade de la construction?

L'assurance de la qualité, au sens le plus large du terme, permet d'éliminer les effets de l'erreur humaine lors de l'étude des plans, de la fabrication des composants et de la construction de la centrale.

Dans l'hémisphère occidental, les connaissances techniques relatives à tous les aspects de la sûreté nucléaire sont si bien établies et si librement échangées à l'échelon tant national qu'international qu'il est fort improbable qu'une erreur fondamentalement préjudiciable à la sûreté ait pu passer jusqu'à présent inaperçue ou qu'une lacune ait pu subsister dans la masse de connaissances dont on dispose en matière de sûreté.

Les valeurs relevées en cours d'exploitation sont non seulement enregistrées et vérifiées à la centrale, mais encore analysées en détail et même recalculées par un organisme d'inspection indépendant ou par le service d'homologation lui-même. Un contrôle analogue s'applique aux spécifications, à la fabrication et aux protocoles d'essai des composants importants pour la sûreté ou appelés à fonctionner sous pression. Tous les stades de la fabrication, à commencer par les matériaux de base, sont surveillés de près et de nombreux spécimens sont prélevés pour examen par des équipes de contrôle de la qualité et par des inspecteurs spécialisés. En particulier, la vérification des soudures et l'analyse des résultats des essais sous pression sont faites par au moins deux inspecteurs indépendants conformément aux codes techniques agréés. Les résultats sont officiellement

consignés afin que l'on puisse les réexaminer à tout moment.

Ce dispositif constamment amélioré d'assurance et de contrôle de la qualité permet de minimiser les risques d'erreur ou de négligence humaines aux stades de l'étude et de la construction et, plus important encore, en atténue les effets éventuels. En d'autres termes, *comme on ne peut totalement exclure l'erreur humaine, il en est tenu compte dès la conception des matériels, de sorte que la probabilité qu'elle provoque un accident est extrêmement faible.*

Il est impossible d'atteindre la perfection absolue, en ce qui concerne tant le matériel que les opérateurs. Ce que l'on a pu obtenir par l'automatisation et un contrôle très strict de la qualité, c'est que la technologie et sa mise en œuvre garantissent que l'erreur ou la négligence humaines, ou les imperfections techniques, ne peuvent pas entamer les défenses en profondeur au point de présenter un réel danger. Aussi peut-on dire, en quelque sorte, que *la technologie tolère l'erreur.*

10. Ne pourrait-on pas construire les centrales nucléaires sous terre afin de mieux se protéger contre les rejets radioactifs?

Bien que cette solution puisse paraître renforcer la protection de l'environnement contre les rejets abondants de matières radioactives dus à un accident, elle n'améliorerait pas sensiblement la sûreté. De toute évidence, placer une centrale dans une caverne ou dans un silo souterrain n'éviterait pas les accidents. Au mieux, cela compliquerait le cheminement des dégagements de radioactivité et pourrait, dans certains cas seulement, atténuer les effets d'un accident, mais il se peut tout aussi bien que la sûreté en souffre. En effet, les complications techniques supplémentaires au niveau de la conception rendraient la construction, l'exploitation et la maintenance plus difficiles, sans parler des problèmes d'accès.

En outre, les infiltrations d'eau souterraine viendraient aggraver les difficultés. A moins qu'il ne s'agisse d'une caverne dans de la roche compacte, un site en profondeur compliquerait encore les problèmes de protection de l'environnement et notamment des eaux souterraines. Il faudrait excaver une fosse d'au moins 60 mètres de diamètre et de profondeur pour loger le bâtiment du réacteur. Dans la plupart des cas, cela impliquerait une étude très poussée des structures nécessaires pour isoler les eaux souterraines, probablement utilisées pour l'approvisionnement local en eau potable.

A supposer, néanmoins, que la formule souterraine permette d'améliorer sensiblement la sûreté, il est certain que les problèmes de technologie, d'exploitation et de financement pourraient être résolus. Au demeurant, la centrale souterraine ne serait un gage de plus grande sûreté qui si la roche ou le sol environnant pouvait servir de confinement complémentaire contre les rejets radioactifs dus à un grave accident de réacteur, par ailleurs peu probable. Or, l'efficacité du confinement dépend surtout de l'étanchéité et de la fiabilité des joints au niveau des nombreuses pénétrations de conduites et de câbles, des événements et des panneaux de visite par lesquels le réacteur communique avec les autres systèmes et espaces de la centrale situés à l'extérieur du

confinement. L'étanchéité de l'enceinte de confinement proprement dite pose beaucoup moins de problèmes. Comme les raccordements d'un réacteur sont toujours les mêmes, que celui-ci soit installé en surface ou sous terre, la fiabilité des protections ne serait pas améliorée dans le second cas.

Le réacteur souterrain serait sans doute mieux protégé contre les chutes d'aéronefs, les attaques au missile et les risques de la guerre, mais sa sûreté ne s'en trouverait pas suffisamment améliorée pour justifier le supplément de complications et de dépenses.

11. A quels risques extérieurs une centrale nucléaire peut-elle être exposée?

Les dangers qui menacent une centrale de l'extérieur peuvent l'affecter dans sa totalité. Les risques énumérés ci-après sont à considérer; si les conditions particulières au site le justifient, il faut en tenir compte dans les plans:

- séismes;
- conditions météorologiques adverses, par exemple: températures extrêmes de l'air ou de la mer, vents violents, pluie ou neige très abondantes, foudre, cyclones ou ouragans;
- inondation du site résultant, par exemple, d'un raz de marée;
- chute d'aéronefs;
- tassement ou affaissement du sol;
- activités industrielles extérieures au site;
- substances dangereuses;
- sabotage;

12. Quelles sont les parades?

On a le choix entre quatre possibilités:

- étudier des matériels et des structures pouvant résister aux phénomènes considérés;
- assurer la protection physique de l'installation, par exemple en prévoyant des bâtiments spécialement conçus;
- redondance, diversification, isolement et séparation des systèmes essentiels;
- moyens de combattre les effets du phénomène, tel le matériel de lutte contre l'incendie.

Pour protéger une centrale nucléaire, en particulier son réacteur, contre les dangers extérieurs, on prévoit des systèmes et structures spécialement étudiés pour que l'on puisse arrêter le réacteur en toute sécurité dans toutes les circonstances prévisibles, assurer son refroidissement et maintenir l'intégrité du circuit primaire.

Les phénomènes extérieurs peuvent avoir des effets très variables dont l'intensité est généralement inversement proportionnelle à leur fréquence. Il en est tenu compte dans les critères de conception pour la sûreté, lesquels indiquent les probabilités de défaillance du dispositif de sûreté.

Les protections à prévoir contre les risques inhérents au site sont étudiées dans chaque cas d'espèce.

Séismes. La centrale est conçue pour résister aux effets du plus fort séisme prévisible et pour que le réacteur puisse être arrêté et suffisamment refroidi après l'événement.

Les centrales situées dans des régions où les tremblements de terre sont assez fréquents sont équipées de sismographes qui déclenchent automatiquement l'arrêt du réacteur bien avant que l'intensité sismique maximale tolérable soit atteinte.

Inondations. Un niveau d'inondation de référence est calculé pour chaque centrale à partir des niveaux atteints dans le passé et compte tenu des raz de marée, de la hauteur d'onde, du régime des cours d'eau locaux et de tous autres phénomènes pouvant influencer sur le niveau des eaux.

Chutes d'aéronef. Lorsqu'il y a lieu de tenir compte du trafic aérien, le plan de masse de la centrale est conçu de façon à minimiser les dommages que causerait un aéronef en s'écrasant sur le site. En outre, le survol à basse altitude peut être soumis à certaines restrictions.

13. Les centrales nucléaires sont-elles protégées contre les attaques terroristes?

Oui, mais les détails du dispositif de sécurité ne sont pas publiés afin de ne pas compromettre leur efficacité. Comme les conditions de la protection physique varient d'un pays à l'autre, le sujet ne peut être traité que de façon générale.

Les centrales nucléaires sont dotées de caractéristiques de conception qui leur assure une protection assez efficace contre les actes terroristes; la plupart des points critiques où se trouvent des matières nucléaires sont entourés de boucliers radioprotecteurs dont la structure massive offre également une bonne protection contre les actes de sabotage éventuels. Les systèmes de sûreté sont redondants et diversifiés et les sous-systèmes sont souvent séparés les uns des autres, de sorte qu'il faudrait endommager un grand nombre d'organes très dispersés avant que le public soit mis en danger.

Les centrales sont en outre équipées de protections spécifiques contre les attaques terroristes: délimitation de zones avec obstacles physiques, systèmes de verrouillage, contrôle du personnel et des véhicules aux points d'entrée et service de garde.

Les caractéristiques intrinsèques prévues et les dispositions prises en matière de sûreté font qu'il serait très difficile à des terroristes de causer dans la centrale des dommages qui pourraient avoir des effets sur l'environnement. S'il cherchent vraiment à agresser une population, ils auront la tâche bien plus facile en attaquant d'autres objectifs à l'extérieur.

14. Un réacteur peut-il exploser comme une bombe atomique?

Absolument pas, et cela pour des raisons fondamentales de physique.

Un réacteur et une bombe atomique reposent sur le même principe: la fission du noyau de l'atome d'uranium — ou de plutonium. Dans les deux cas, elle est provoquée par des neutrons et libère de l'énergie. Le phénomène résulte d'une réaction bien connue dite «en chaîne», de la manière suivante: un neutron provoque la fission d'un noyau d'uranium, au cours de laquelle plusieurs neutrons sont émis, généralement deux, qui induisent à leur tour la fission de deux nouveaux noyaux, et ainsi de suite. Ce qu'il importe de savoir, c'est que

cette réaction en chaîne est beaucoup plus lente dans le réacteur que dans la bombe. La grande différence, c'est dans la vitesse de production de l'énergie, c'est-à-dire la cinétique générale de la réaction.

Dans un réacteur qui fonctionne normalement, la réaction est réglée de telle sorte qu'après chaque fission un seul neutron peut induire une nouvelle fission, l'autre étant absorbé par la matière dont sont composées les barres de commande. Le nombre de neutrons actifs reste donc invariable, de même que la quantité d'énergie produite. Ce n'est qu'au moment du démarrage ou de l'arrêt du réacteur que leur nombre augmente ou diminue (réaction divergente ou convergente), mais les variations sont très lentes, car le nombre de neutrons (la réactivité) est maintenu à des valeurs très proches de l'unité. Ce réglage se fait par l'intermédiaire des barres de commande.

Dans la bombe, par contre, on accélère le plus possible la multiplication des neutrons, afin que leur effectif, et la puissance par conséquent, augmentent très rapidement. Quand on sait que le nombre de neutrons double en un millionième de seconde, on comprend facilement qu'il atteigne un chiffre astronomique en moins de un millième de seconde, et cela en partant d'un seul neutron. Le phénomène ne se produit qu'avec de l'uranium fortement enrichi ou du plutonium, tandis que, dans le réacteur, on utilise de l'uranium faiblement enrichi ou naturel, ou encore un mélange d'uranium et de plutonium.

Obtenir la multiplication des neutrons n'est cependant pas chose facile parce que certains phénomènes physiques s'opposent à la divergence de la réaction en chaîne; c'est le cas en particulier de l'énergie libérée par les fissions qui tend à fragmenter l'ensemble de la masse si bien que la réaction cesse. Dans la bombe, on y remédie en disposant des explosifs chimiques de façon à contenir la dispersion des fragments pendant le temps nécessaire à la multiplication des neutrons afin de

permettre la libération de l'énorme quantité d'énergie engendrée par la fission.

On peut imaginer qu'une augmentation accidentelle de la réactivité dans un réacteur pourrait déclencher la multiplication des neutrons et, par conséquent, de la puissance, mais c'est précisément dans ce cas qu'interviendraient les effets contraires dont on vient de parler, et sans qu'il soit possible de les annuler. Comme il n'y a pas d'explosifs pour maintenir ensemble les fragments d'uranium qui tendent à se séparer rapidement sous l'effet de la montée subite de la température, la quantité d'énergie libérée par ce genre d'accident reste très modeste comparée à celle d'une bombe A, même de faible puissance, et ne représente que quelques dix millièmes de celle-ci.

L'accident de Tchernobyl en est un bon exemple. En quatre secondes environ, la puissance du réacteur s'est multipliée par 1000, mais l'énergie thermique totale libérée s'est limitée à quelques centaines de milliers de mégajoules, soit la quantité normalement produite par le réacteur en moins de deux minutes. A titre de comparaison, rappelons qu'une bombe A libère plusieurs milliards de mégajoules thermiques.

L'explosion qui s'est produite à Tchernobyl n'était donc pas nucléaire. La multiplication par 1000 de la puissance du réacteur a provoqué une énorme disproportion entre la production d'énergie et l'extraction de la chaleur. Le combustible très surchauffé s'est rompu en menus fragments qui ont subitement vaporisé l'eau du circuit de refroidissement, engendrant ainsi l'onde de choc qui a détruit l'enceinte du réacteur, non conçue pour résister à une telle pression. Les matières radioactives se sont alors dispersées. L'énergie mécanique de l'explosion représentait, semble-t-il, l'équivalent de quelques milliers de kilogrammes de TNT, alors qu'une petite bombe atomique (tactique) atteint une puissance de plusieurs dizaines de kilotonnes. Aussi les dégâts matériels ont-ils été très localisés.

