

# Un cauchemar de plomberie : la tuyauterie nucléaire

*Une centrale américaine qui laisse soudain fuir des jets de vapeur radioactive, cinq autres qui sont arrêtées par crainte du même accident : tout cela est advenu par la faute de tuyauteries défectueuses. Et cela coûte des sommes immenses. Car plus de vingt ans de technologie nucléaire n'ont pas encore permis de résoudre ce véritable casse-tête arithmétique et métallurgique qu'est la « plomberie » d'une centrale.*

■ La plomberie domestique, ce peut être contrariant. Mais la « plomberie » atomique...

Le 28 mars dernier, vers 4 heures du matin, une défaillance des pompes alimentaires d'un des deux réacteurs de la centrale de Three Mile Island provoqua un arrêt d'urgence de l'installation. Le cœur du réacteur qui n'était plus refroidi s'échauffa. Il s'en suivit un jaillissement de vapeur radioactive dans le bâtiment étanche du réacteur, puis à plusieurs reprises, vers l'extérieur, donc une pollution radioactive. Les circuits de secours entrèrent en fonction mais ne purent empêcher la formation d'une bulle de gaz dangereux dans la cuve, empêchant un refroidissement correct des éléments combustibles dont environ 1 % ont fui. Pendant plusieurs jours, les techniciens ne surent dominer la situation, provoquant une très vive émotion chez la population avoisinante, puis dans tous les Etats-Unis. Le président des USA lui-même se rendit sur le site de Three Mile Island et n'exclut pas la possibilité d'une évacuation de la région concernée au cas où la situation deviendrait dangereuse. Il semble maintenant que les problèmes immédiats aient pu être résolus, mais le doute a été jeté dans le monde entier sur la sécurité des centrales nucléaires de type PWR, à eau primaire. Le ministre sud-coréen de la Science profita de l'incident américain pour annoncer la fermeture de la seule et unique centrale nucléaire de son pays, construit sur le modèle de la centrale PWR américaine. Il en résultera certainement une reconsidération des procédures d'exploitation et des installations de secours des centrales de ce type dans tous les

pays intéressés. Certains programmes de construction seront peut-être revus. Cependant, en France, il faut noter que les centrales en service ou prévues de ce type, utilisent un procédé Westinghouse et non Babcock et Wilcox dont les générateurs de vapeur sont très différents. Ainsi en cas d'incident semblable (perte de refroidissement des générateurs de vapeur), les exploitants disposeraient d'une quinzaine de minutes au lieu d'une quarantaine de secondes, comme les Américains. La différence est considérable car elle permet un arrêt « en douceur » du réacteur, sans déclenchement général des circuits de secours.

Cet incident sérieux survenait deux semaines après les arrêts de cinq autres centrales américaines, pour erreurs de calcul dans la conception des tuyauteries du circuit primaire. Détail : parmi elles figure la centrale à eau pressurisée de Beaver Valley, toujours en Pennsylvanie, qui avait servi de référence aux centrales françaises du même type, c'est-à-dire aussi de Fessenheim. C'est-à-dire encore de presque toutes les unités mises en chantier par EDF, les surrégénérateurs Phénix et Super-Phénix exceptés.

Ces « problèmes de tuyauterie » sont fâcheux pour les Etats-Unis : Beaver Valley, Surry I et II, James Fitzpatrick et Maine Yankee, les 5 centrales arrêtées, représentent une puissance totale de 4 000 MW ; mais ils sont inquiétants pour bien d'autres : c'est par hasard, en effet, que l'on s'est aperçu du défaut. Quel défaut ? Une « paille » : les vannes des tuyaux pesaient un poids différent selon qu'elles avaient été conçues avant ou après 1972. Avant 1972, ont expliqué

les installateurs Stone & Webster, on utilisait un certain code de calcul ; après 1972, on en a utilisé un autre, plus « performant ». Et le premier avait fait commettre une erreur d'arithmétique !

Cette révélation a incité la Commission de Réglementation nucléaire des Etats-Unis (NCR) à demander un arrêt immédiat des centrales, en dépit du coût élevé de la mesure : 10 millions de francs ou un milliard de centimes par jour. Le Sénat américain a été saisi ; le président de la NCR a invoqué le principe « sécurité avant tout ». Deux à trois semaines seront nécessaires pour analyser les erreurs commises, et trois à quatre mois pour y remédier et normaliser tout le matériel susceptible de défaillance.

Pour comprendre ce coûteux remue-ménage, il faut savoir que les tuyauteries primaires, celles du système de refroidissement des réacteurs, sont posées sur des supports. Ces supports sont prévus pour un poids donné. Si les vannes des tuyaux sont trop lourdes, ces supports ne suffisent plus. Surtout en cas de tremblement de terre.

Le tremblement de terre est l'accident de référence des ingénieurs. S'il fait céder les supports des tuyaux, puis les tuyaux eux-mêmes, il y a fuite du liquide de refroidissement ; le réacteur court à la surchauffe. Ce serait l'accident le plus grave.

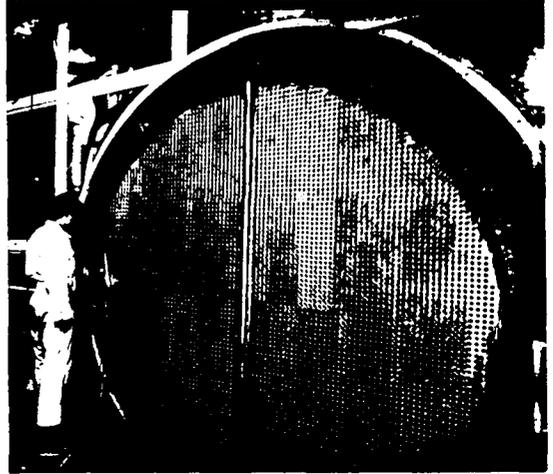
Heureusement, la société Framatome, responsable des calculs d'installation de nos centrales, n'a pas utilisé le mode de calcul fautif ; de toute manière, EDF assure que son propre organisme de calcul et de sécurité vérifie systématiquement et indépendamment les calculs des constructeurs. Il y a plusieurs années, d'ailleurs, que certaines lacunes des normes américaines avaient incité EDF et le CEA à mettre au point des codes de calcul originaux. Il ne semble donc pas que nous soyions menacés par la même mésaventure que les Américains, tout au moins en ce qui concerne les 5 centrales volontairement arrêtées. Le Commissariat de Sécurité des Installations Nucléaires (CSIN) suit d'ailleurs de près l'affaire américaine pour en tirer la leçon qui s'imposait.

Les aléas de la « plomberie » atomique n'en demeurent pas moins, ainsi que le démontre l'accident de Three Mile Island.

Un réacteur, c'est dans l'esprit du public une cuve ou un caisson en béton et des échangeurs de chaleur ; on oublie le plus souvent les composants annexes, mais fondamentaux, comme les pompes et les circuits auxiliaires et encore plus souvent l'aspect le plus humble de l'installation : les tuyauteries, qui relient les éléments. Un tuyau, c'est simple à en paraître bête en regard d'éléments aussi complexes qu'une cuve ou un générateur de vapeur entre lesquels il établit la liaison. Hélas, s'il défaille, c'est aussi grave qu'un infarctus pour un humain. Il entraîne alors des arrêts de production qui peuvent s'étendre sur des années entières.

Le pompon en matière de pannes de ce genre doit être sans doute attribué à la centrale Chinon III, dont un défaut de tuyauterie a forcé à reconstruire intégralement le circuit primaire,

celui qui véhiculait le gaz carbonique servant de fluide caloporteur. L'immobilisation dura plus de deux ans et porta sur quelque 1 000 t de matériel... Ne citons que pour mémoire la panne d'EL 4, à Brennilis, en Bretagne, qui dura plusieurs années et entraîna un changement complet des générateurs de vapeur, par suite de fuites du circuit secondaire vers le primaire, ou la panne de St-Laurent-des-Eaux, l'une des dernières de « notre » filière uranium-graphite-gaz carbonique, qui obligea tout simplement à réduire la puissance



**Le générateur de vapeur de Fessenheim : plus il y a de tuyaux, plus il y a de risques.**

de la centrale, par suite de fuites d'eau ou de vapeur dans les générateurs de vapeur et pollution du cœur du réacteur... En outre Phénix n'est pas encore sorti de ses « maladies de jeunesse » causées, encore une fois, par la tuyauterie (fissures systématiques entraînant l'arrêt de la centrale pour inspection et réparations) et Tihange et Fessenheim non plus n'ont pas résolu tous leurs problèmes de plomberie.

Mais pourquoi donc ces problèmes apparaissent-ils ? Et quels sont-ils précisément ?

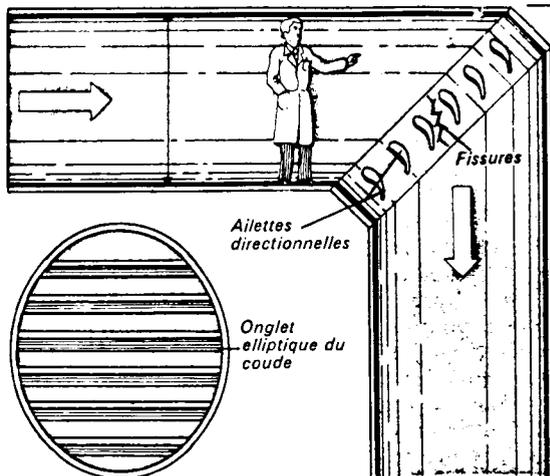
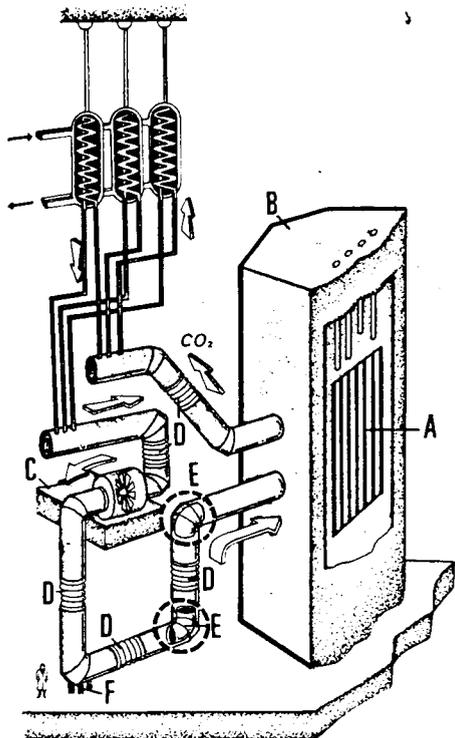
La tuyauterie en question est composée :

- soit de tubes, de petite dimension, par exemple 10 à 50 mm de diamètre, de quelques millimètres d'épaisseur, essentiellement utilisés dans les échangeurs de chaleur et groupés en faisceaux de plusieurs milliers parfois, formant ainsi de vastes surfaces d'échange ;
- soit de tuyaux proprement dits, dont le rôle essentiel est le transport de fluides d'un point à un autre et dont les dimensions peuvent être considérables (1 800 mm de diamètre pour le circuit primaire de Chinon III, par exemple) et dont les épaisseurs peuvent atteindre 50 mm.

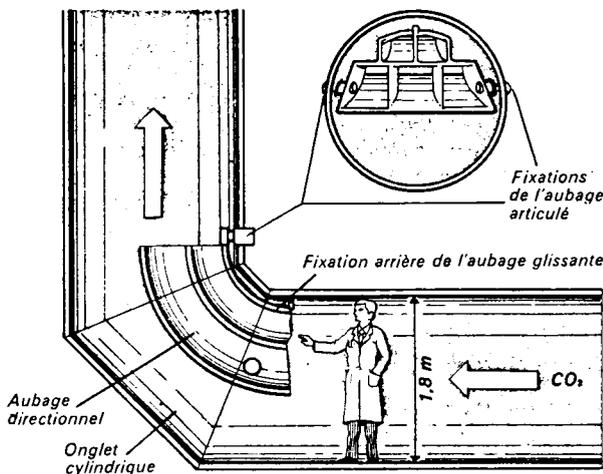
Tant que le tube ou le tuyau vont en ligne droite, pas trop de problèmes. Mais ils doivent pourtant prendre des virages. Si le virage est en arc de cercle, le conduit devient un tore ; s'il est à angle droit, la section de son diamètre devient elliptique ; s'il aboutit à un cylindre de plus

# A CHINON : DES ENNUIS DE PLOMBERIE

Vue générale du circuit primaire de Chinon III, (ci-dessous). On a représenté le schéma de l'une des huit demi-boucles qui constituent l'ensemble des tuyauteries de refroidissement de la centrale. On remarque la forme en « manivelle » de la conduite et la présence des compensateurs qui lui donnent sa souplesse. **A** : cœur ; **B** : caisson du réacteur ; **C** : massif de la turbosoufflante ; **D** : compensateur ; **E** : coude à aubages ; **F** : support à ressort.



**Ancien coude à ailettes directionnelles (ci-dessus).** Il s'y produisait des fissures. **Coude à aubages directionnels à la centrale de Chinon III (ci-dessous) :** les articulations permettent un déplacement relatif de l'aubage en cas de dilatations différentielles.



grand diamètre, son ouverture représente, en géométrie dans l'espace, une courbe du quatrième degré, c'est-à-dire une « quadrienne », dont la description n'est pas aisée ; chacun de ces cas pose des problèmes de dynamique des fluides et de technologie, aggravés encore par la dilatation qui se produit à haute température, sans parler des contraintes que posent les supports fixes évoués plus haut.

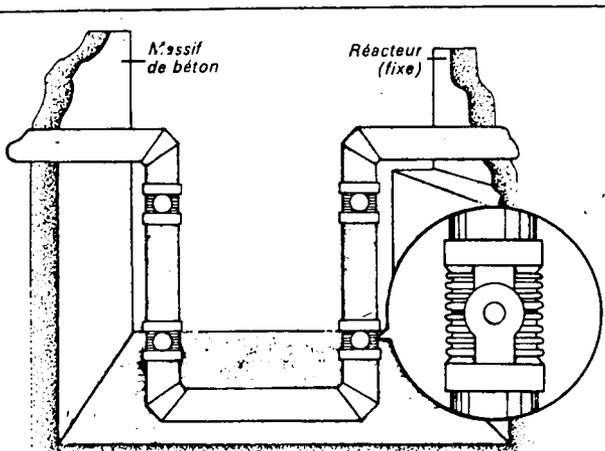
Voilà qui suffit déjà à occuper son ingénieur.

Mais il y a plus : le génie n'est pas du seul côté de l'ingénieur, apparemment ; il semble être également du côté du tuyau, qui « s'ingénie » à ne pas faire ce qu'on lui demande, et se met à fuir. Type de « mission impossible » : concevoir une centrale qui ne fuit pas ! Ces milliers de mètres carrés de surface d'échange qui permettent de libérer, soit vers un cours d'eau, soit dans l'air la chaleur sécrétée par le réacteur sont sans doute imperméables aux fluides, mais non

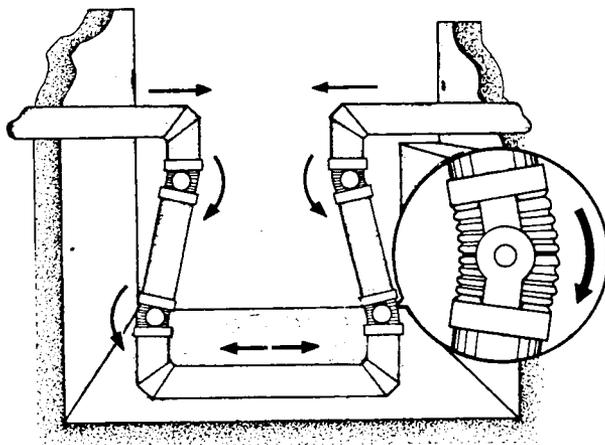
à la chaleur ; ils passent leurs temps à se dilater et à se contracter, jouant avec la température extérieure un jeu infini. C'est ainsi que nos centrales uranium-graphite-gaz, type Chinon ont longtemps laissé échapper chaque jour près d'une dizaine de tonnes de gaz carbonique du circuit primaire ; heureusement aussi, on a pu réduire largement ce taux.

Voici quelques-unes des principales raisons pour lesquelles se produisent des fuites :

- la conception et les calculs sont erronés (exemple américain) ; les supports n'assurent plus leur fonction ;
- si la souplesse de leur matériau n'est pas assez grande, les tuyauteries peuvent se fissurer ou même se rompre par suite des dilatations et contractions qui se produisent dans les montées et descentes de température (exemple Chinon III, où se produisent des fissures) ;
- les fluides véhiculés sont corrosifs, surtout



**La tuyauterie froide (ci-dessus).** Le rôle des compensateurs à soufflets est de permettre aux dilata-tions de la tuyauterie de se produire le plus librement possible (mais en évitant les vibrations) et de prendre des angles qui modifient sa longueur, dans la tuyau-terie chaude (ci-dessous).



dans les échangeurs de chaleur. La corrosion de l'eau déminéralisée, riche en acide borique, et circulant à haute température et sous forte pression a posé d'appréciables problèmes à nos aciéristes ; s'ils en ont actuellement la pratique, il n'en va pas de même pour ce que l'on appelle la corrosion intergranulaire, comme nous le verrons plus loin.

- les problèmes de « piquage », c'est-à-dire de jonction entre cuve de réacteur et tubulures n'ont pas été convenablement résolus ; on discute encore, à l'heure actuelle, des normes de sécurité posées par ces jonctions ;
- enfin, on peut évoquer les vibrations subies par ces dizaines de kilomètres de tubes et tuyaux, sous l'effet des fluides qui y courent à plus de 100 km/h.

Et que se passerait-il s'il y avait rupture franche ? Un geyser de vapeur ou d'eau bouillante irait frapper les points sensibles de la centrale.

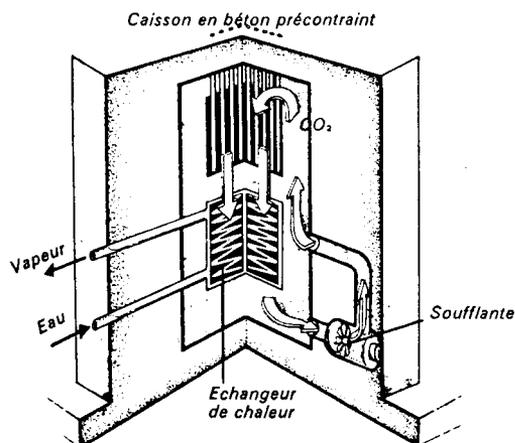
Faut-il alors évoquer les dangers pour les tra-vailleurs éventuels ?

On comprend dès lors pourquoi les construc-teurs et responsables ont mis au point le formi-dable arsenal d'informatique grâce auquel on fusille, mitraille, hache menu et pulvérise autant que faire se peut tout les problèmes de la « plomberie ».

PIPE STRESS (U.S.A.), SAP IV (U.S.A.), NASTRAN (NASA), ADL PIPE (U.S.A.), ASKA (Allemagne Fédérale) ne sont que les plus connus des codes informatiques, parfois monstrueux, que des dizaines d'ingénieurs met-tent en œuvre pendant des années pour réduire à des chiffres les contraintes et les résistances utiles normalement ou exceptionnellement, en cas de tremblement de terre « simple » ou « ma-joré », puis en tirer les paramètres de diamètre, d'épaisseur, de poids, d'alliage et de durée qui doivent permettre d'éviter la catastrophe finan-cière ou le désastre tout court. Ce sont de grands instituts qui ont construit ces programmes et ce sont les entreprises qui paient les cours de for-mation, assez chers.

Néanmoins, l'erreur peut se glisser par la partie d'un code qui est moins utilisée que les autres et donc moins rodée. Cette erreur ira se fondre éventuellement dans les résultats finaux ; elle pourra entraîner une autre erreur infime, portant sur une fraction de gramme, quelques dixièmes de millimètre ou de degré centigrade, et elle pourra subsister des années et parfois même durer autant que le code de calcul lui-même. C'est pourquoi l'on considère qu'il existe des codes « jeunes » et des codes « mûrs ». Les codes sont même mortels : ainsi ADL PIPE est mort en 1972 en dépit de sa célébrité, entraînant dans sa tombe le secret de tares inconnues dans

## A ST-LAURENT-DES-EAUX : LES FRANÇAIS AVAIENT SUPPRIMÉ LES TUYAUX



Les problèmes de tuyauterie primaire sont ici évités grâce à la formule des échangeurs intégrés dans le caisson du réacteur.

sa partie dynamique, celle qui, par exemple, portait sur les séismes.

Comment a-t-on construit Chinon III, puisqu'à l'époque, en 1960, il n'y avait pas encore de ces codes de calcul imposants ? De l'avis général, sa « plomberie » a pourtant fini par être superbe.

Appartenant à la filière française uranium-graphite-gaz, Chinon III se compose d'un réacteur enfermé dans un caisson de béton précontraint, d'échangeurs de chaleur ou générateurs de vapeur, situés à proximité de 4 gros ventilateurs qui font circuler le gaz carbonique utilisé pour le refroidissement et qu'on appelle « turbo-soufflantes ».

Des tuyauteries d'acier de 1,80 m de diamètre intérieur font circuler les gaz entre ces éléments. La pression du gaz est d'environ 30 bars, sa température de 360 à 400 °C dans les parties chaudes entre réacteur et échangeur, 200 °C dans les parties froides où se trouvent les turbo-soufflantes. Le gaz, très dense, circule à plus de 100 km/h dans les tuyauteries qui sont donc soumises, en plus de la pression et des dilatations, à des efforts dynamiques importants.

Un des principaux problèmes rencontrés, consistait à limiter les efforts de dilatation entre les divers points raccordés, une tuyauterie chaude étant forcément plus longue qu'une froide.

Le réacteur formait évidemment un point fixe, masse de béton imposante et point de référence de l'installation. Les turbo-soufflantes, pour des raisons mécaniques, devaient également être pratiquement fixes. Il n'était donc pas question d'utiliser les appuis mobiles utilisés sur les ponts métalliques — un côté du pont est fixé sur une rive, l'autre est appuyé sur des rouleaux métalliques qui permettent la dilatation sous l'effet de la température extérieure. Pour un pont de 40 m, la différence de longueur atteint environ 2 cm entre - 15 °C et + 35 °C, elle serait assez forte pour faire éclater les meilleures coulées en béton, si le pont était bloqué entre elles.

Les échangeurs, eux, bénéficiaient d'une certaine liberté en étant suspendus par de longs tirants d'acier qui leur permettaient d'osciller légèrement. En définitive, l'essentiel de la souplesse des tuyauteries fut obtenue en leur donnant une forme de manivelle — ou de lyre — sur les branches de laquelle furent installés des compensateurs permettant à la tuyauterie de prendre un certain angle sous les efforts de dilatation. Ces compensateurs sont essentiellement constitués d'une partie ondulée, mince et flexible, qui tient la pression et d'un système à joint de cardan qui permet la rotation dans divers plans (voir illustration). Cependant, la forme en manivelle adoptée pour la tuyauterie conduisait à introduire de nombreux coudes dans celle-ci. Pour des raisons de bonne circulation du gaz, on dut installer dans ces coudes un système d'ailettes directionnelles, soudées à l'intérieur de l'onglet du coude. (Voir schéma.)

Or, les tuyauteries furent calculées « à la main ». Toutes les conditions théoriques de dé-

faillances étaient réunies : elles eurent lieu au niveau des soudures des ailettes — une soudure est toujours un point sensible, dans les onglets des coudes — un coude représente une discontinuité de structure où les contraintes s'amplifient. Il eût fallu des années à une armée d'ingénieurs pour effectuer un calcul complet, tenant compte des discontinuités, ce qui se fait maintenant couramment. Et des fissures se formèrent systématiquement.

Ces fissures apparaissaient à chaque révision de l'installation, et leur nombre augmentait, visiblement en liaison avec les cycles thermiques de la centrale, c'est-à-dire aux dilatations dues aux arrêts-démarrages, ou variations brutales de puissance du réacteur. On appelle ce phénomène « fatigues oligocycliques ». Le phénomène s'amplifiant, il fallut se résoudre à arrêter l'installation, puis les réparations devenant inefficaces, à remplacer toutes les tuyauteries. Lourde addition : près de trois ans d'arrêt, un millier de tonnes de matériel et des études et conceptions reprises à zéro.

On chercha d'abord les raisons de défaillances et, si l'on conserva la forme générale des conduits en raison du matériel déjà implanté, réacteur, échangeurs et turbo-soufflantes, on recalcula soigneusement les tuyauteries, adopta des coudes de forme et d'épaisseur différentes, dans un métal plus résistant et enfin on remplaça les ailettes par des aubages directionnels non soudés, mais guidés dans les coudes. (Voir schéma).

C'était bien, c'était trop tard ! On avait abandonné la formule de Chinon III, et la filière française utilisa ensuite à Saint-Laurent-des-Eaux I et II et Bugey I la technique du caisson intégré : les échangeurs de chaleur sont maintenant regroupés avec le réacteur dans un même caisson de béton précontraint et les tuyauteries primaires ont purement et simplement disparu — ainsi que les problèmes qu'elles posaient.

Cependant, quand EDF a choisi la filière américaine à eau pressurisée, les tuyauteries primaires ont réapparu entre la cuve du réacteur, les générateurs de vapeur et les pompes. Elles restent l'un des points sensibles des centrales nucléaires actuelles, quoique n'ayant pas encore provoqué d'incident en France et paraissant maintenant d'une bonne fiabilité.

Les échangeurs de chaleur, eux aussi, sont très fréquemment une cause de panne ou d'ennuis pour les centrales nucléaires. Cela tient sans doute au rôle même de ces appareils, qui doivent mélanger thermiquement deux fluides — échanger la chaleur — tout en les séparant matériellement. Les risques de fuite sont donc multipliés avec la grandeur de la surface d'échange, qui se compte en milliers de mètres carrés, soit en kilomètres de tubes. On utilise des tubes, c'est-à-dire de petites tuyauteries de 16 ou 19 mm de diamètre par exemple, afin d'obtenir une surface d'échange importante pour une vitesse de fluide convenable. En effet, la section d'un tube est proportionnelle au carré de son diamètre, alors que la surface du tube est proportion-

nelle au diamètre. Ainsi, pour une même vitesse de fluide, donc une même section de passage, un gros tuyau aura une surface extérieure bien moindre qu'un grand nombre de petits tubes. Il suffit par exemple de comparer la durite du circuit de refroidissement d'une automobile, et le radiateur constitué de petits tubes où circule la même quantité d'eau. Le radiateur est un échangeur eau-air. Si la température de l'eau augmente, il se transforme en générateur de vapeur. Cela veut dire que le circuit primaire (l'eau) chauffe trop et on en vient à claquer le joint de culasse. Sur un réacteur PWR, on assiste à une rupture de tuyauterie primaire, vaporisation de l'eau de refroidissement, puis rupture des gaines de combustible trop chauffées, jouant ici le rôle du joint de culasse (ce genre d'accident est évidemment pris en compte dans les calculs de sûreté nucléaire).

Or, assez paradoxalement, on retrouve ce cas lors de l'accident de la centrale de Three Mile Island. Si la tuyauterie primaire n'a pas cédé, le phénomène équivalent a eu lieu, car les soupapes de sécurité du circuit primaire se sont ouvertes à la suite d'une panne de pompes alimentaires, provoquant la vaporisation de l'eau de refroidissement du réacteur. La suite des événements a montré que dans la réalité les choses ne se passent pas toujours aussi bien que selon les calculs.

Et, en l'occurrence, des leçons précieuses devront être tirées de l'accident car une cascade de questions se pose, à laquelle nous ne pouvons, bien entendu, pas encore répondre.

En particulier :

- Comment une panne totale de l'alimentation en eau des générateurs de vapeur est-elle possible ?
- Pourquoi cette panne a-t-elle entraîné une dépressurisation du réacteur et son assèchement ?
- Pourquoi les techniciens ont-ils dû laisser s'échapper des produits radioactifs dans l'atmosphère en si grande quantité ?
- D'où provenait précisément la fameuse bulle de gaz, hydrogène et oxygène, qui empêcha de refroidir correctement le cœur ? Décomposition de l'eau sous l'effet des radiations ou de la chaleur ?

De la réponse à ces diverses questions dépend

la crédibilité que l'on peut attacher à l'analyse de l'accident de référence et aux moyens de secours prévus.

En principe, les tubes eux-mêmes supportent peu de contraintes. Ils subissent la pression du fluide contenu qui peut être importante (environ 200 bars), mais leur petit diamètre fait que leur épaisseur peut rester faible. On leur évite les problèmes de dilatation en leur donnant la forme d'une longue épingle à cheveux, libre de s'allonger. Le cintrage des tubes fait d'ailleurs l'objet de contrôles soigneux et ne pose pas de problème draconien. Bien sûr, on contrôle aussi l'étanchéité et la régularité de l'épaisseur de chaque tube, et cela sur toute sa longueur. On utilise des méthodes par ultra-sons ou par courants de Foucault.

Les problèmes deviennent plus épineux lorsqu'il s'agit de grouper ensemble tous ces tubes. Pour obtenir une étanchéité absolue, ils doivent être soudés sur une plaque. Celle-ci est, en gros, une galette de métal forgé d'environ 2 m de diamètre et 600 mm d'épaisseur, percée de milliers de trous par où passent les tubes — 2 fois autant de trous que de tubes puisqu'ils sont en épingle à cheveux. Les deux bouts de chaque tube sont soudés sur le bord de la plaque tubulaire. Le circuit primaire est ainsi fermé.

Il est fermé et surtout il est étanche, car un contrôle soigneux est effectué — rayon gamma, ressuage, tests à l'hélium, etc. Et pourtant, c'est dans ces soudures que des fuites auront le plus de chances d'apparaître, car elles risquent surtout de sensibiliser le métal à la corrosion, et à une corrosion bien particulière, car il s'agit d'acier inoxydable.

On a choisi l'acier inoxydable, alliage à forte teneur en nickel et chrome, pour le circuit primaire, car celui-ci contient, pour des raisons de neutronique, de l'eau déminéralisée additionnée d'acide borique comme on l'a vu plus haut. L'acide sert à fixer le taux de réactivité du réacteur, car le bore absorbe les neutrons ; c'est en quelque sorte une barre de contrôle chimique, dont on joue en faisant varier plus ou moins la concentration. Mais il s'agit quand même d'un acide qui attaquerait l'acier ordinaire. Le choix d'un acier inoxydable est donc impératif. Inconvénient : les aciers inoxydables choisis sont sensibles à la corrosion intergranulaire.

Il s'agit d'une forme de corrosion très spécifique où le métal n'est pas attaqué et dissous, comme un acier classique. A haute température, en présence d'acide et surtout après sensibilisation par une soudure, le métal, qui est formé de milliers de petits cristaux ou grains, devient friable et tombe en poussière : les grains n'ont plus de cohésion entre eux. Ainsi, un morceau de tube de mauvaise composition attaqué par un traitement spécial — bien plus sévère que pour ses conditions d'utilisation — produit le bruit mat d'un morceau de carton quand on le fait tomber sur une table métallique ! On peut facilement l'écraser. Cet inconvénient des aciers inoxydables semble dû à une migration des

carbures de chrome dans chaque cristal, vers la périphérie où ils se concentrent, affaiblissant la liaison avec le cristal voisin. C'est pourquoi on choisit des aciers à très basse teneur en carbone afin de limiter le plus possible la présence de ces carbures ; ce qui a d'ailleurs l'inconvénient de diminuer la résistance mécanique de l'acier...

Des normes précises décrivent ces essais et il arrive parfois que des coulées entières soient renvoyées chez l'aciériste.

La « plomberie » constitue donc une partie essentielle de toute installation nucléaire. Elle joue, en général, comme la cuve du réacteur, le rôle de deuxième barrière, entre la première barrière, constituée par les gaines des éléments combustibles contenant l'uranium fissile et la troisième barrière, formée par le bâtiment de béton doublé d'acier qui renferme cuve et générateurs de vapeur. A ce titre, son importance est primordiale et c'est elle que concernent directement les codes et réglementations nucléaires. Elle a atteint une sécurité satisfaisante, même si la fiabilité l'est un peu moins. On travaille toujours à perfectionner calculs, soudure et contrôles. Et l'on se console de ces dépenses en se disant que tout cet effort bénéficie à l'industrie en général.

Enfin, cette tuyauterie obsédante, comment la conçoit-on ?

On raisonne ainsi : elle subit des efforts ; ces efforts engendrent des contraintes ; ces contraintes sont calculées une à une, pour chaque cas de fonctionnement ; puis elles sont comparées à des critères de sécurité. Ceux-ci, à leur tour, sont établis en fonction du métal : limite d'élasticité, résistance à la rupture, résistance à la fatigue, le tout à la température de fonctionnement. Par-dessus le marché, les critères sont établis en fonction d'un coefficient de sécurité, prévu par la réglementation. Par exemple, en France et aux Etats-Unis la contrainte due à la pression doit être trois fois plus petite que la limite d'élasticité du métal.

Les principaux efforts pris en compte sont :

- La pression ; ses calculs sont généralement simples et bien connus.
- Le poids : il peut être très grand si le fluide véhiculé est dense, comme l'eau ou le sodium. Son influence détermine le supportage. On inclut donc dans le calcul les réactions des divers supports sur la tuyauterie et cela devient déjà plus complexe, car il existe trois types de supports : les butées qui bloquent tout déplacement, les ressorts qui réagissent avec une force proportionnelle au déplacement (c'est le cas des classiques boîtes à ressorts que l'on voit dans de nombreuses usines), et les supports à portance constante, pour lesquels le déplacement est libre mais la force agissant sur la tuyauterie constante. Ces appareils complexes agissent comme le ferait

un câble passant par une poulie et auquel serait pendu un contrepoids. De plus, tous ces types de supports peuvent agir dans les trois dimensions et également pour les trois mouvements de rotation.

● Les effets dynamiques : les tuyauteries sont susceptibles de vibrer, soit qu'elles soient entraînées par des appareils vibrant eux-mêmes, comme des turbo-soufflantes, soit sous l'effet du fluide qui les parcourt — turbulences, coups de bélier. Les calculs ne peuvent guère s'effectuer que sur ordinateur et nécessitent parfois une nouvelle définition du supportage, afin d'éviter les vibrations de grande amplitude et généralement de basses fréquences. On peut également installer des supports amortisseurs de vibration.

● Les effets dus aux dilatations : une tuyauterie n'est jamais totalement libre de se dilater ; elle exerce donc des efforts considérables sur ses différents points d'appui. Ceux-ci sont pris en compte dans les calculs sur ordinateur et interviennent également dans la définition de supportage. Et il y a bien souvent contradiction entre la liberté nécessaire aux dilatations et la nécessité d'éviter les vibrations et de soutenir le poids de la tuyauterie. Dans certains cas, on est obligé de définir un nouveau tracé de la tuyauterie ou de la munir de compensateurs.

● Le séisme : un tremblement de terre entraîne des efforts dynamiques particuliers, dus à la masse même de la tuyauterie. Il s'agit ici de vibrations à basse fréquence surtout, donc dangereuses. Ici encore le supportage doit être calculé en conséquence, et en tenant compte de tous les impératifs précédents. Le calcul, là, est encore plus délicat ; on l'effectue à l'aide d'un code très élaboré. C'est probablement à ce niveau qu'une erreur de conception des supports a eu lieu pour les centrales américaines récemment arrêtées.

Mais ce n'est pas fini : la longue liste de calculs que voilà n'a alors permis que de concevoir et de définir la tuyauterie et son supportage. Tout est à recommencer, une fois le dessin de la tuyauterie figé, ses supports mis en place, ses coudes et ses compensateurs définis ! On recalcule en effet l'ensemble pour chaque cas de fonctionnement, en combinant les différents efforts mis en cause. Puis pour chaque cas ; et comme ils sont très nombreux, on compare les contraintes obtenues aux contraintes admissibles par les critères de sécurité. On vérifie également que le nombre de cycles thermiques prévus pendant la vie de la tuyauterie, n'entraînera pas de dépassement de la limite de fatigue du métal.

L'ensemble de ces calculs de vérification constituera alors la note de calcul de la tuyauterie, prise en compte par les services de sécurité.

Au gré des préférences, on jugera que la plomberie atomique est un cauchemar ou, au contraire, un domaine passionnant. Un fait est sûr : elle est vitale ; et elle va encore se perfectionner.

On en sera bien content le jour où l'on aura maîtrisé la fusion...

**François PAVY** ■