

## **Annexe 12**

### **Viellissement des centrales nucléaires de type REP**

**Yves Bréchet**

#### **La problématique du vieillissement**

Le vieillissement d'un composant peut être défini comme la dégradation avec le temps de sa capacité à remplir la fonction pour laquelle il a été conçu. Lors de sa conception, on a choisi un ou des matériaux, une ou des formes qui peuvent être assemblées ensemble. C'est le vieillissement de cet ensemble qu'il faut considérer.

Quand on pose la question du vieillissement des centrales, il est important de distinguer le vieillissement des matériaux et le vieillissement des composants.

Les composants principaux des centrales nucléaires françaises peuvent assez naturellement se classer en trois catégories : les composants « consommables » (comme le combustible et les gaines de combustible), les composants « remplaçables » (comme les internes de cuves, la circuiterie, les échangeurs de chaleur) et les composants « non remplaçables », qui déterminent la durée de vie du dispositif (comme la cuve). La question du vieillissement se pose en des termes différents suivant le type de composants : le vieillissement des « consommables » doit être contrôlé pour assurer une consommation optimale du combustible nucléaire ; le vieillissement des « remplaçables » doit être géré pour optimiser l'exploitation du dispositif et minimiser le nombre et la durée des arrêts de tranche ; le vieillissement de la cuve « non remplaçable » contrôle la durée de vie de la centrale. Les questions de vieillissement, compte tenu des matériaux utilisés pour réaliser les centrales, sont majoritairement centrées autour des matériaux métalliques, avec comme caractéristiques majeures la sensibilité de leurs propriétés mécaniques à leur microstructure et la réactivité au milieu environnant *via* les mécanismes de corrosion. Dans le cas particulier des centrales nucléaires, l'irradiation, les sollicitations mécaniques et l'environnement interviennent de façon couplée dans la dégradation des matériaux et donc le vieillissement des composants.

#### **Spécificité des matériaux métalliques**

La première caractéristique physicochimique des métaux et alliages est la nature de la liaison chimique. De façon dominante, la cohésion des métaux et alliages est liée à un gaz d'électrons libres ou presque libres dans leur mouvements : ces électrons mobiles leur donnent une grande réactivité chimique et expliquent la facilité des réactions d'oxydoréduction avec le milieu extérieur ; c'est pour cette raison qu'un des modes de vieillissement des alliages métalliques est la corrosion et, en particulier la corrosion par l'eau des réacteurs, chaude, sous pression, ayant subi des phénomènes de radiolyse.

La deuxième caractéristique des métaux et alliages est que leurs propriétés, et en particulier leurs propriétés mécaniques, dépendent, au-delà des effets de composition proprement dits, de la microstructure, c'est-à-dire de la façon dont la matière est distribuée à l'échelle micronique ou submicronique. Cette microstructure comporte en général des grains ayant une orientation cristallographique donnée, séparés par des joints de grains. L'intérieur des grains est très souvent polyphasé, deux ou plusieurs phases, de cristallographie et de composition chimique différentes, coexistent dans des morphologies très variées. Ces microstructures sont obtenues

par des traitements thermiques et thermomécaniques effectués le plus souvent loin de l'équilibre thermodynamique. La nature des phases, leur morphologie, leurs proportions dépendent du traitement thermique qui leur a donné naissance et de l'histoire des matériaux en cours de fonctionnement des composants, en particulier dans les cas d'un fonctionnement à haute température. C'est pour cette raison qu'un mode de vieillissement courant des matériaux métalliques est le vieillissement thermique, ou évolution des propriétés mécaniques suite à un maintien prolongé en température.

### **Spécificité des appareils sous pression : le cas de la cuve, la question de la ténacité et de la transition ductile-fragile**

Comme dans tous les appareils sous pression, il faut éviter la propagation brutale de fissures dans la paroi de la cuve. À cet effet, on choisit les matériaux qui permettent de rester dans des conditions physiques où cela n'est pas possible.

La grandeur qui mesure la possibilité de propagation d'une fissure ~~cela~~ est la ténacité. Propager une fissure relâche de l'énergie élastique (force motrice) et coûte de l'énergie « dissipée », en créant des nouvelles surfaces et en déformant plastiquement le matériau. L'énergie dissipée plastiquement est très largement dominante devant l'énergie de surface pour tous les matériaux métalliques. Quand une fissure est trop courte, ou que la contrainte appliquée est trop faible, l'énergie élastique relâchée est trop faible en regard du coût énergétique de propagation et la fissure est stable. Dans le cas inverse, la fissure est instable et se propage brutalement. Au-delà d'une contrainte critique, une fissure se propagera brutalement si la ténacité est trop faible et la contrainte trop élevée : la fissure deviendra instable pour des longueurs inférieures aux longueurs détectables par contrôle ultrasonore (contrôle relativement facile à réaliser industriellement) et donc la sécurité ne sera pas convenablement assurée. C'est pour cela que les autorités de sûreté accordent une grande importance à la caractérisation de la ténacité.

En général, la ténacité est d'autant plus grande que la dissipation plastique pour la propagation de fissure est plus élevée et donc une limite d'élasticité élevée (qui rend la déformation plastique plus difficile) est en général associée à une plus faible ténacité. Un deuxième aspect est l'influence de la température sur la fragilité du matériau. Cela tient spécifiquement à la nature des aciers de cuve. Pour un matériau cubique centré (comme l'acier de cuve en majorité), la capacité à se déformer plastiquement dépend fortement de la température : à basse température il est très raide et à haute température plus souple. À basse température, il tend donc à rompre de façon fragile en dissipant peu d'énergie plastique. À haute température, il rompt de façon ductile en dégageant beaucoup d'énergie dissipée. Il y a une température de transition dite « ductile-fragile » qui représente la gamme de température en deçà de laquelle le matériau a une faible énergie dissipée et où il est d'un emploi plus risqué. Quand on durcit le matériau, la ténacité baisse et cette « température de transition » augmente. On ne pourra faire fonctionner de manière sûre un appareil sous pression que si les fissures détectables sont sous-critiques (ténacité suffisante) et, évidemment, si la température de transition ductile-fragile ne se rapproche pas trop de la température ambiante. Le problème spécifique principal du vieillissement de la cuve est lié à la modification sous irradiation des propriétés de ténacité et de température de transition des aciers bainitiques la constituant.

### **Une sollicitation particulière : l'irradiation**

L'irradiation perturbe tout l'édifice des alliages, aussi bien du point de vue de la structure cristallographique que du point de vue de la chimie et des transports de matière. La collision avec des particules de haute énergie induit des déplacements atomiques ; il en résulte la

formation de défauts ponctuels hors équilibre thermodynamique, qui eux-mêmes modifient les phénomènes de transport dans les alliages, peuvent induire par leur élimination des ségrégations chimiques aux interfaces, peuvent condenser sous forme de boucles de dislocations et en conséquence durcir le matériau.

La complexité du vieillissement sous irradiation est double : la caractérisation des phénomènes est expérimentalement difficile, compte tenu de la radioactivité des échantillons, et la modélisation doit aller de l'échelle atomique, où se situe le dommage élémentaire, à l'échelle macroscopique de la pièce où se situent les conséquences sur le comportement en service. La compréhension des phénomènes élémentaires d'irradiation (création de défauts ponctuels) repose actuellement sur des codes de dynamique moléculaire. Une fois la population de défauts créée, leur dynamique ultérieure, leur condensation sous forme de boucles d'irradiation, leur élimination sur des puits structuraux comme les joints de grains sont relativement bien comprises, au moins conceptuellement. Il en est de même des phénomènes de stabilité de phase sous irradiation ou de ségrégations chimiques induites. L'incidence de ces évolutions microstructurales sur les propriétés mécaniques est bien référencée, mais moins bien comprise. La compréhension du comportement mécanique sous irradiation est encore imparfaite. Le comportement de matériaux irradiés sous une sollicitation externe appliquée de façon temporaire (ce qui serait le cas d'un accident) est mieux compris. Si l'incidence sur la limite d'élasticité est en bonne voie de compréhension, les instabilités de comportement mécanique induites par irradiation (et en particulier les phénomènes de localisation) rendent la compréhension des autres conséquences beaucoup plus délicate et il manque encore à ce jour les outils conceptuels pour la mener à bien.

## **Le vieillissement sous irradiation des cuves de réacteurs**

Les aciers ferritiques « non alliés » sont les aciers de construction de chaudières les plus classiques. Les aciers faiblement alliés sont utilisés en cas de besoin de caractéristiques mécaniques plus élevées dans le domaine des températures inférieures à 350 °C, par exemple pour des capacités sous pression de fort diamètre (avec souci de limiter les épaisseurs) : c'est le cas de la cuve des réacteurs. Ces matériaux présentent toutefois plusieurs inconvénients : l'augmentation des caractéristiques de traction se fait en général aux dépens de la résistance à la rupture fragile (résilience, ténacité) ; ils sont sensibles à la fragilisation par l'hydrogène, ce qui peut entraîner des problèmes de corrosion ou des difficultés de soudage ; enfin, la vitesse de trempe variant beaucoup entre la peau et le cœur des pièces épaisses, des hétérogénéités de structure et de propriétés préjudiciables à l'emploi peuvent apparaître.

Les chaudières nucléaires à eau pressurisée sont soumises en service à des sollicitations de nature mécanique, thermique (température de fonctionnement inférieure à 350 °C) ou chimique (présence d'eau boriquée, de lithine et d'hydrogène dissoute dans le milieu primaire ; ammoniacque ou morpholine et hydrazine dans le milieu secondaire) pour des durées de fonctionnement très longues, 40 ans voire 60 ans. Le plus souvent, la prise en compte des problèmes de corrosion conduit au choix d'aciers inoxydables (addition de chrome à des teneurs supérieures à 12-13 %) qui fournissent un revêtement interne de la cuve.

Pour les aciers ferritiques (comme les aciers de cuve), qui peuvent être soumis à une irradiation neutronique maximale de l'ordre de  $6,5 \cdot 10^{19}$  neutrons/cm<sup>2</sup> (d'énergie > 1 MeV), les éléments résiduels cuivre et phosphore qui interagissent avec les défauts ponctuels sont la cause de la majeure partie de la fragilisation. Outre la composition chimique du matériau et sa structure, les autres paramètres significatifs sont le nombre de neutrons reçus par unité de surface (fluence) et la température. Le flux et le spectre d'énergie des neutrons ne paraissent pas avoir d'effet significatif. Les conséquences de l'irradiation sur les aciers ferritiques (aciers

de cuve) sont une augmentation de la limite d'élasticité, qui conduit à une augmentation de la température de transition ductile-fragile (DBTT), et donc à une augmentation du risque de rupture fragile par clivage. Les facteurs déterminant l'amplitude de la fragilisation par irradiation sont bien connus. Ce sont les teneurs en éléments résiduels cuivre et phosphore. Certains éléments d'alliage (Ni, ...) peuvent venir renforcer l'effet de ces éléments. À partir de là, des formules de prévision (pour le métal de base et pour les joints soudés) ont pu être proposées. Ces formules sont du type  $DBTT = f(\%Cu, \%P, \%Ni\dots)$ .

L'analyse par sonde atomique de la microstructure des aciers ferritiques irradiés permet d'accéder à la distribution spatiale des solutés présents dans l'acier de cuve. Elle montre que l'irradiation neutronique d'un acier de cuve REP conduit à la formation d'amas de solutés (Cu, Ni, Mn, Si, P, ...) dont ni la taille (3 à 4 nm), ni la composition chimique (à l'exception vraisemblable de la teneur en cuivre), ne semblent évoluer avec la fluence. Seul leur nombre augmente avec la fluence. La solution solide ferritique présente après irradiation neutronique une baisse de la concentration de cuivre jusqu'à 0,03 %at. La concentration en cuivre des amas formés augmente avec la teneur nominale de l'acier. Ces amas contribuent comme les défauts ponctuels et la ségrégation aux joints de grains à la fragilisation de l'acier soumis à irradiation neutronique, sans qu'on connaisse véritablement la part de leurs contributions respectives. La simulation numérique a permis ces dernières années des progrès importants dans la compréhension des mécanismes de formation du dommage, aussi bien dans la génération des défauts ponctuels, dans leurs cinétiques d'agrégation, dans la formation des ségrégations et des amas.

Par ailleurs, afin de suivre l'évolution sous irradiation de la cuve, un programme de surveillance a été mis en place. Il consiste à placer, dans des capsules, en des endroits appropriés dans la cuve, des éprouvettes représentatives des matériaux employés. Ces éprouvettes sont extraites et examinées à intervalles de temps réguliers selon un programme permettant de surveiller l'évolution des principales propriétés de ces matériaux durant la durée de vie de la cuve.

### **Le cas des composants remplaçables**

Si le vieillissement de la centrale est principalement à associer au vieillissement de la cuve, on ne peut faire confiance aux composants remplaçables que s'ils sont régulièrement testés et remplacés si nécessaire, ce qui est exactement ce que prescrivent les autorités de sûreté. Les internes de cuve, qui sont en acier inoxydable, sont très fortement irradiés, dans un milieu agressif et sous contrainte mécanique : c'est un mode de vieillissement qui conduit régulièrement à des ruptures de vis par « corrosion sous contrainte assistée par l'irradiation » (IASCC). Pour ce qui est des circuits primaires, secondaires et des échangeurs de chaleur qui sont essentiellement en aciers austénoferritiques et alliages Nickel Chrome, le mode de vieillissement majeur est d'une part la précipitation induite par traitement thermique (en particulier la démixtion du chrome dans la ferrite des aciers austénoferritiques) et la corrosion dans un milieu aqueux, l'irradiation étant sur ces composants d'une importance moindre. Il en résulte qu'ils sont plus faciles à vérifier, plus faciles à remplacer, et donc moins susceptibles de poser des problèmes durables.

### **Faut-il reconsidérer le programme de prolongation de vie des centrales à la lumière de l'accident de Fukushima ?**

Dans le contexte des accidents nucléaires, il est important de garder en mémoire qu'aucun des grands accidents nucléaires (Windscale, Three Mile Island, Tchernobyl, et aujourd'hui

Fukushima) n'est lié à un vieillissement des centrales, mais à un défaut de conception et/ou à une faute de fonctionnement (pour Fukushima, dans le contexte d'un séisme-tsunami majeur).

La tentation consistant à « arrêter les plus anciennes », par « précaution », tout instinctive et naturelle qu'elle puisse paraître, n'est pas d'ordre rationnel. La distinction que nous avons faite entre les composants « non remplaçables », « remplaçables » et « consommables » sert de guide de réflexion.

Dans des dispositifs comme les centrales nucléaires, régulièrement inspectées pour le remplacement des pièces à durée de vie limitée, avec les consommables régulièrement renouvelés, la question du « vieillissement de la centrale » qui pourrait mettre en cause la sécurité de son fonctionnement est essentiellement la question du vieillissement de la cuve. Or on peut estimer avec une fiabilité raisonnable les pertes de performance de ce composant liées au vieillissement. Ce vieillissement dépend fortement des compositions chimiques et par exemple, il ne peut être estimé à partir de données sur les centrales russes ou américaines, mais doit l'être sur les nuances d'acier effectivement utilisées dans les cuves des centrales françaises. L'augmentation de la température de transition ductile/fragile après 40 ans de fonctionnement est de 40 à 80 °C seulement (ce qui laisse une marge très confortable par rapport à la température ambiante et a fortiori par rapport aux températures de fonctionnement), et la perte de ténacité est d'environ 10 % (estimée à partir de la baisse observée du palier ductile). Cela signifie que la cuve de la centrale peut supporter une contrainte qui vaut jusqu'à 90 % de celle pour laquelle elle a été dimensionnée, ce qui une fois encore est largement suffisant pour les critères de sûreté, compte tenu des marges de sécurité en conception. Du strict point de vue des matériaux, les centrales « anciennes » construites sur le même concept et les mêmes critères de dimensionnement, ne sont pas substantiellement plus dangereuses que leurs cadettes du simple point de vue de leur âge.

Pour ce qui est des composants consommables (combustibles et gaines), ils ne sont pas plus « anciens » que dans des centrales plus récentes et ne nécessitent pas de traitement particulier.

Pour ce qui est des composants « remplaçables », régulièrement contrôlés et remplacés, il n'y a pas lieu de rendre les critères de remplacement plus sévères.

Mais plus urgent que de fermer à la hâte quelques centrales plus anciennes comme victimes expiatoires en temps de panique, il est plus rationnel de reconsidérer la centrale comme un système global. On peut se demander systématiquement si les choix faits pour les composants « non remplaçables » rigidifient totalement les conceptions ou permettent une évolution des composants remplaçables, et si oui dans quelle mesure. Au-delà de la question du vieillissement des matériaux, on peut et on doit considérer aussi les questions de vieillissement de systèmes d'exploitation (électronique, programmes informatiques) des systèmes de pompage, et des ouvrages de génie civil. Enfin, il semble important d'analyser les modes de fonctionnement et de dysfonctionnement des piscines d'entreposage des combustibles usagés, et du vieillissement possible de ces sites et de leurs équipements. Ces questions doivent être examinées avec soin, et sans doute des remplacements et des mises à niveau devront être décidées, mais les mesures à prendre éventuellement relèvent du remplacement et ne nécessitent certainement pas un arrêt définitif de l'outil industriel.