

À propos de RTE, si on faisait un peu de métallurgie ?

Le Réseau de Transport de l'Électricité (RTE) a annoncé début novembre 2016 que la sécurité d'approvisionnement durant l'hiver 2016-2017 s'annonçait délicate. En effet, 21 réacteurs nucléaires sur 58 étaient à l'arrêt. Une bonne douzaine pour maintenance ou rechargement de combustible, mais les autres à la demande de l'Autorité de Sûreté Nucléaire (ASN), à la suite de la découverte d'une concentration de carbone dans les aciers des fonds de virole de certains générateurs de vapeur. La disponibilité du parc nucléaire français devrait alors accuser un recul de puissance de 10 000 mégawatts (MW) sur un volume total de 63 000 MW. Certes, bien qu'en diminution, le parc des centrales thermiques peut encore délivrer une puissance de 20 000 MW si nécessaire, et les centrales éoliennes et photovoltaïques montées en puissance peuvent apporter un soutien plus ou moins aléatoire en fonction de la météo de l'hiver. Les craintes restent cependant vives dans l'attente de la pointe traditionnelle de la demande lors d'un jour de grand froid.

Le réacteur et les générateurs de vapeur

Il faut alors se rappeler quelques notions de génie thermique et de métallurgie pour bien comprendre le problème. La conception de la filière

nucléaire française dispose d'une cuve dans laquelle l'eau boratée du circuit primaire en contact avec le cœur est sous une pression de 155 à 175 bar et une température de 350 °C. Cette eau sous pression circule dans un échangeur et réchauffe l'eau d'un circuit secondaire pour la transformer en vapeur qui fera tourner les turbines génératrices d'électricité. Cette disposition sépare nettement le circuit secondaire de vapeur du circuit primaire, elle est un facteur de sûreté comparée à d'autres conceptions étrangères (figure 1).

La partie basse de la virole du générateur de vapeur doit pouvoir supporter la différence des températures des deux fluides semblable à un choc thermique : 350 °C/120 °C, et donc avoir des propriétés mécaniques suffisantes. Or, il a été observé dans cette partie basse des concentrations en carbone dans l'acier supérieures à la norme, qui pourraient avoir une incidence sur ses propriétés.

Carbone et fabrication

L'origine de ces contrôles et des demandes d'arrêts de l'ASN remonte à presque deux ans lorsque des analyses métallurgiques du fond de cuve et du couvercle du réacteur EPR (« Evolutionary Power Reactor ») de Flamanville fabriqués aux forges de Creusot Loire ont détecté des anomalies.

Sur cet acier faiblement allié de type 16MND5 – de composition Mo 0,5, Mn 1,4, Ni 0,4, Cr 0,15, Si 0,3 et C 0,15 –, des valeurs de 0,3 % en carbone sur les faces externes ont été observées. De la même façon, sur les fonds des générateurs de vapeur fabriqués par Creusot Loire mais aussi par le sous-traitant japonais JCFC (Japan Casting & Forging Corp.), des valeurs ponctuelles de 0,3 % et même de 0,39 % en carbone sur un acier voisin de la même famille 16-20 MND5 ont été observées, alors que la valeur moyenne devrait être de 0,2 %. Cet écart de composition chimique de l'acier avec le carbone est bien connu des métallurgistes et elle est quasi inhérente aux techniques de forgeage sur des lingots de fort tonnage.

Rappelons-nous alors quelques souvenirs de métallurgie, et en particulier les diagrammes TTT (température-temps-taux de transformation) (figure 2) qui présentent les domaines de transitions de phases en fonction des vitesses de refroidissement. Pour l'EPR, en partant d'un lingot de 150 tonnes à 900 °C, on le transforme en galette de 450 mm d'épaisseur et de 5 m de diamètre qui est ensuite emboutie pour donner une calotte de 330 mm d'épaisseur (figure 3). Évidemment, en atelier, la vitesse de refroidissement du cœur est plus lente que celle des extrémités. Dans les deux courbes du diagramme TTT (les deux « nez ») qui délimitent les domaines, l'austénite ($Fe\gamma$ cfc) reste métastable pour les temps courts ; par contre, pour les temps plus longs, on traverse le domaine de transformation en bainite qui est un mélange de ferrite et de cémentite (carbure de fer Fe_3C). La transformation structurale $Fe\gamma$ cfc \rightarrow $Fe\alpha$ + Fe_3C s'accompagne d'une structure métallographique où la ferrite est disposée en plaquettes séparées par de fines particules de cémentite. Cela signifie que le carbone a plus diffusé dans la partie centrale, ce qu'on retrouve bien par analyse.

Évidemment, les écologistes antinucléaires qui n'ont jamais potassé de cours de métallurgie et les médias qui n'en ont guère suivis plus, ont poussé des cris d'orfraies dénonçant la mal-façonnage, pointant de plus les manques réels des contrôles qualité chez Creusot Loire (maintenant AREVA) et demandé l'arrêt immédiat du nucléaire (sans avoir cependant pris la précaution de faire des provisions de bois de chauffage...).

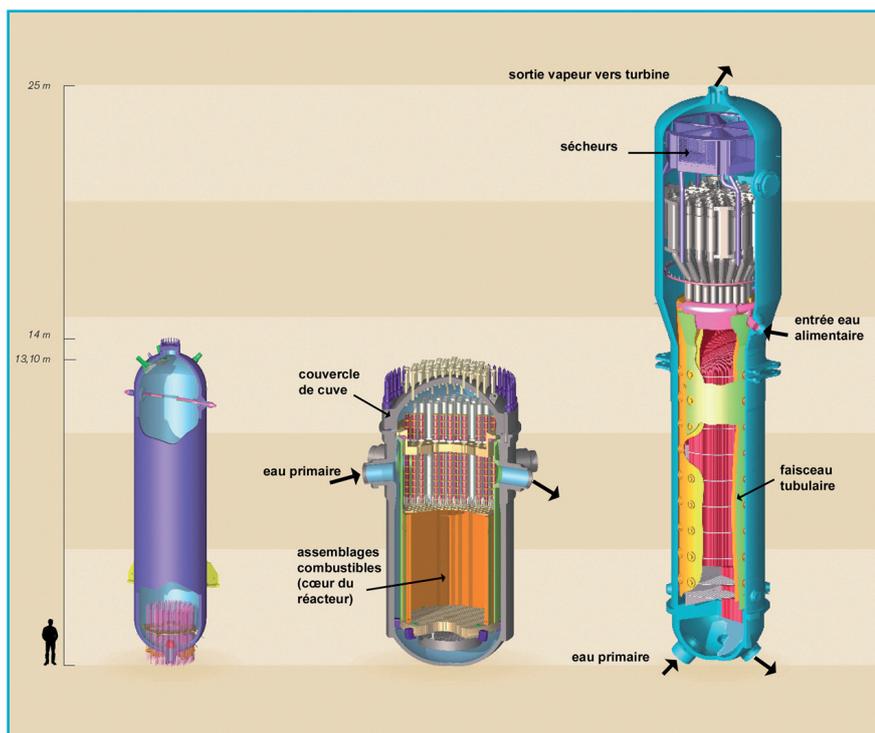


Figure 1 - Réacteur et générateur de vapeur. © AREVA.

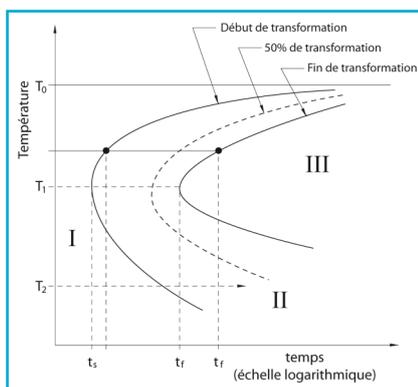


Figure 2 - Diagramme TTT (température-temps-taux de transformation) schématique.

Les chiffres et conséquences

Regardons plus calmement les analyses. La teneur en carbone est surtout due à l'apparition de fines particules de cémentite qui peuvent avoir une influence sur la résilience et la ténacité de l'acier. La résilience est caractéristique de la tenue au choc mécanique ou thermique – ah, vénérable mouton de Charpy ! La ténacité est la résistance à la propagation de défauts ou fissures. Une série de tests a été effectuée sur le couvercle et le fond. En couches externes, les valeurs de résilience (en joules) sont comprises entre 46 et 73 J, avec une valeur moyenne (52 J) légèrement inférieure à la valeur limite (60 J). En couche interne, les valeurs sont comprises entre 136 et 173 J, largement au-dessus de la valeur limite.

Signalons de plus que l'intérieur de la cuve, et donc le fond, est revêtu par de

l'acier inoxydable anticorrosion (Ni,Cr). Le revêtement est effectué par fusion de bandes de 8 mm d'épaisseur, provoquant en sous-couches intermédiaires des variations thermiques qui entraînent elles aussi des transformations austénite → ferrite. Les métallurgistes d'AREVA et du CEA connaissent bien ces phénomènes et surveillent activement, en liaison avec les ingénieurs japonais de JCFC, les évolutions des alliages utilisés dans différentes pièces d'ingénierie, et notamment les quelques impuretés présentes.

Le vieillissement des réacteurs

Plus intéressants que ces polémiques : les tests et modélisations sur les composants matériaux des REP (réacteurs à eau pressurisée) actuels et EPR futurs. Les aciers notamment de la cuve sont soumis aux irradiations venant du cœur du combustible :

- les rayonnements α et bulles d'hélium qui en découlent sur les barres de combustible, conduisant à des gonflements ;
- les rayonnements β provoquant des chocs élastiques sur les atomes du réseau métallique, initiateurs de défauts ponctuels comme des paires de Frenkel ;
- les neutrons qui ont des effets d'irradiation et de déplacement des atomes. Des paniers qui contiennent des éprouvettes d'essai sont placés à l'intérieur de la cuve et sont irradiés trois à cinq fois plus que l'acier de la cuve. Ces éprouvettes sont ensuite prélevées et

testées en ténacité, résilience et température de transition fragile-ductile. C'est effectivement cette dernière qui est témoin du vieillissement des aciers et l'élément essentiel de la durée de vie. On caractérise les matériaux irradiés par leur « dpa », ou déplacements des atomes : la valeur de 100 dpa correspond à un solide où les atomes ont pu être déplacés 100 fois au cours de la durée de vie. L'acier bainitique 16MND5 à 300 °C est estimé à 0,1 dpa, c'est-à-dire que les atomes métalliques ont une chance sur dix d'être déplacés au cours de la durée de vie compte tenu de leur éloignement de la source d'irradiation. La simulation mathématique des défauts engendrés, comme les interstitiels, les lacunes, permet la comparaison avec les essais accélérés. En se tenant toujours en fonctionnement à des températures supérieures de 50 °C à la température de transition ductile-fragile, la durée de vie des cuves des réacteurs 1 300 MW est estimée à 70-75 ans et pour l'EPR, à 80 ans.

La panne du secteur ?

Bien que les contrôles poussés continuent, l'ASN a autorisé plusieurs réacteurs à redémarrer. Mais RTE a aussi des solutions pour pallier d'éventuelles pannes de réseau dont l'interconnexion avec nos voisins européens qui permet des échanges, à moins que ceux-ci soient aussi en forte demande, et l'effacement de certains consommateurs électro-intensifs (métallurgie, chimie). Mais aussi l'attitude citoyenne des consommateurs avec la nouvelle application que lance RTE sur smartphone, « Alerte Eco2mix », qui alerte l'utilisateur sur les pics de consommation à venir. Ainsi, en hiver, une chute de 1 °C entraîne une demande supplémentaire de 2 400 MW. Ces arrêts coûtent cher, car si en avril dernier, le prix spot du MWh était de l'ordre de 30/35 €, fin octobre et début novembre, il avoisinait 60/70 €. Espérons que l'hiver 2016/2017 sera doux, grâce au « réchauffement climatique », et qu'il n'y aura pas de « blackout », sinon vous chaufferez vos nouilles vers 23 h et vous ferez marcher le grille-pain vers 5 h comme un citoyen responsable !

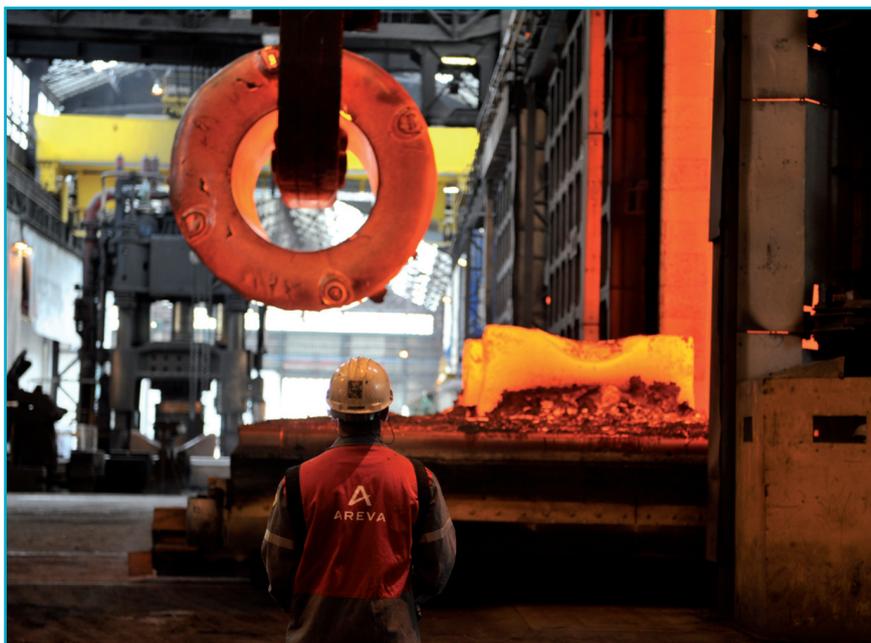


Figure 3 - Chargement d'une virole en cours de forgeage pour réchauffement, usine de Creusot-Forge, 2013.

© AREVA/Jean-Marie Taillat.



Jean-Claude Bernier
Décembre 2016