



Mars 2017

Nucléaire : les défis du futur en matière métallurgique

Avec cette 25^{ème} newsletter, **Métallo Corner** se propose de plonger au cœur de l'énergie nucléaire et d'apporter quelques éclairages sur le rôle de la métallurgie aujourd'hui et pour demain.

Le choix des matériaux métalliques se rencontre à tous les niveaux de la filière nucléaire : du cœur du réacteur avec les assemblages de combustibles, aux gaines des « crayons » combustibles, à la cuve, aux organes périphériques avec les échangeurs de chaleur entre le fluide caloporteur circulant dans le cœur et la vapeur alimentant les turbines. Sans oublier les installations de retraitement, les cuves de dissolution des combustibles usagés, les dispositifs de préparation et de coulée du verre de stockage des déchets ultimes et les sites de stockage des déchets ultimes.

Quel que soit le domaine d'activité, le design des produits et le choix des matériaux dépendront des conditions de service de l'équipement à réaliser. Et dans le domaine du nucléaire, ces conditions de service sont étroitement liées aux paramètres suivants :

- Durées de vie d'installation longue (40 à 60 ans), associées à des durées de vie « produit » variables :
 - Pièces permanentes (comme la cuve, la virole, installée pour plus d'un demi-siècle)
 - Pièces durables mais remplaçables (couvercle de cuve, tubes d'échangeurs)
 - Consommables (assemblages de combustibles, absorbeurs de neutrons)
- Taux de marche élevé (en raison du coût des arrêts)
- Facteurs environnementaux plus ou moins extrêmes
 - Travail sous irradiation (zone du cœur) ou en milieu corrosif
 - Hauts niveaux de sollicitations (fatigue thermique, vibratoire, fluage pour des T°C > 350°C, fretting) principalement au niveau du pressuriseur, du générateur de vapeur ou de la cuve/couvercle.

L'ensemble de ces facteurs ont forcément une influence sur les matériaux au cours du temps : on parle alors de phénomène de vieillissement au sens large pour inclure à la fois l'évolution des propriétés physiques et mécaniques des matériaux mais également les éventuelles possibilités d'érosion ou/et de corrosion. On comprend dès lors aisément que le choix des matériaux est primordial pour le fonctionnement optimal des réacteurs et qu'il est essentiel de développer, en parallèle des matériaux en eux-mêmes, des technologies pour suivre la matière tout au long de la vie de l'équipement. A ce titre, le secteur du nucléaire travaille activement au développement de contrôles dits non-destructifs (C.N.D.) tels que le ressuage, la magnétoscopie, les technologies par vision à haute résolution, les ultrasons multiéléments phases Array, etc.



Mars 2017

Le choix des matériaux métalliques

Face à cet ensemble des sollicitations chimiques et mécaniques, le secteur du nucléaire est amené à utiliser plusieurs grandes familles de matériaux métalliques (Cf. tableau 1) :

- Les aciers de constructions traités thermiquement pour les pièces fortement sollicitées mécaniquement
- Les aciers inoxydables (ferritique, martensitique, austénitique, duplex) pour la tenue à l'oxydation et à la corrosion
- Les alliages de zirconium
- Les alliages base nickel, pour les hautes températures

Tableau 1 : Principales familles d'alliages utilisées dans le nucléaire.

	%C	%Cr	%Ni	Autres Eléments	Exemples d'applications Compléments d'informations
Aciers ferritiques	0,08 à 0,2 %	10,5 à 28%	-	Mo	Faible coef. de dilatation, bonne résistance à l'oxydation.
Acier bainitique (16MnNiMo5)	0,16 %	-	1%	1,25%Mn 0,5% Mo,	Cuve des réacteurs à eau pressurisée français (REP). Durcissement par TTh*. TS** en inox pour limiter la corrosion.
Aciers martensitiques	> 0,15%	9 à 12%		Ni, Mo	Visserie, goujonnerie, robinetterie. Durcissement par TTh*.
Aciers austénitiques		17 à 18%	8 à 12%	Mo, Ti, Nb	Gaines pour le combustible pour les réacteurs à neutron rapide (RNR), renforcées à l'azote par nitruration*.
Aciers austénito ferritique	Alliage moulé utilisé pour les éléments de transfert entre les cuves et les générateurs de vapeur (coudes, tuyauteries, piquages, corps de robinets, volute de pompe primaire).				
Aciers ODS (Oxide Dispersion Strengthened)	Ferritique ou Martensitique				Renforcement de la tenue au fluage par l'introduction d'oxydes nano dans la matrice. Gainage du combustible pour les réacteurs au sodium
Base Nickel	-	10 à 20%	70 à 80%	Fe, Mo, Co, W, ...	Utilisés dans les générateurs de vapeur et les traversées de couvercles de REP.
Alliages de Zirconium	Ces alliages ont été choisis du fait de leur « transparence » au neutron. Alliages développés : Zr-Fr-Cr- Sn et dernièrement Zr-Nb à faible teneur en étain Appl. : Gaines pour le combustible pour les réacteurs à eau pressurisée (REP).				

*TTh : Traitement thermique.

**TS : Traitement de surface.

La fabrication des cuves, viroles, couvercles par forgeage est une opération complexe, compte tenu de la taille des pièces à réaliser tant au niveau de la conduite du moyen de production qu'au niveau de la qualité du demi-produit. Avant forgeage, il est nécessaire de s'assurer que la composition chimique est respectée en tout point du lingot. Un



Mars 2017

travail particulier est apporté à la minimisation de la teneur en cuivre et à la présence des macro-ségrégations.

Dans la majeure partie des cas, les équipements sont des assemblages mécano-soudés, ce qui implique une extrême rigueur lors des opérations de métallurgie des joints soudés, considérés comme des zones sensibles.

Le nucléaire à l'horizon 2030

Plusieurs projets de centrales de quatrième génération, tous aussi ambitieux les uns que les autres, illustrent les défis que devra relever le nucléaire du futur :

- Les réacteurs à neutrons rapides (RNR) auquel il est possible d'associer différents caloporteurs : le sodium (RNR-Na, projet ASTRID), le plomb (RNR-Pb), ou des gaz (RNR-gaz, projet ALLEGRO),

Les neutrons émis lors de la fission d'un actinide ont initialement une vitesse élevée qui limite la probabilité qu'ils interagissent avec la matière fissile (qui est capable de subir une fission nucléaire) et conduisent à une réaction en chaîne. Dans les réacteurs actuels (REP), le choix est de les ralentir par un modérateur (eau, graphite ou eau lourde) qui leur fait perdre leur énergie par chocs successifs. Pour rappel, le seul isotope fissile naturel est l'uranium 235.

Le choix de travailler avec des neutrons rapides réside dans le fait que ces particules ne sont pas modérées. Ces neutrons rapides ont l'avantage de faire fissionner tous les noyaux lourds et non les seuls matériaux fissiles. L'amélioration de l'efficacité des réacteurs à neutrons rapides s'explique également par la limitation des captures stériles, c'est-à-dire les captures ne donnant pas lieu à une nouvelle fission. De plus, les neutrons sortants (que l'on retrouve hors du cœur) peuvent transmuter un matériau a priori inutilisable (fertile mais non fissile qui l'on dépose en périphérie du cœur) en matériau fissile.

- Les réacteurs nucléaires à très haute température ($T^{\circ}\text{C} > 1000^{\circ}\text{C}$), sous hélium gazeux, pour la production d'hydrogène à partir de l'hydrolyse de l'eau.
- Les technologies refroidies à l'eau supercritique, avec l'utilisation d'eau supercritique (> 221 bars, $> 374^{\circ}\text{C}$) dans laquelle vapeur et liquide sont indissociables.
- Les réacteurs à sels fondus à base de thorium, qui présentent des caractéristiques uniques du fait de la nature liquide de leur combustible, qui est aussi le caloporteur, porté à $600-700^{\circ}\text{C}$.

Point commun de chacune de ces technologies, une température de travail augmentée dans le but d'accroître le rendement des installations. Il est clair que ce changement aura

**Mars 2017**

un impact significatif sur la durée de vie des éléments des réacteurs. Des effort doivent donc être fait pour renforcer les alliages actuellement sélectionnés pour les générateurs de deuxième génération et un vaste travail de recherche et de caractérisation doit être entrepris afin de choisir judicieusement les matériaux qui se comporteront le mieux dans des milieux de plus en plus agressifs. Comme on dit au sein du collectif Metallo Corner, il va falloir retrousser nos manches !