

Les Tubes Hexagonaux de la Génération IV

E. DELOYE^a, P. TARDIF^a

a. Valinox Nucléaire, 5 avenue du Maréchal Leclerc, 21500 MONTBARD

Résumé :

Dans le cœur des réacteurs à neutrons rapides au sodium, les tubes sans soudure hexagonaux, appelés boîtiers, servent d'enveloppes de maintien aux gaines de combustibles. Pour répondre aux spécificités de la Génération IV, les caractéristiques de ces TH ont évoluées depuis SUPERPHENIX. Les dimensions géométriques ont été augmentées et le matériau est choisi plus résistant, mais moins déformable.

La fabrication industrielle de ces nouveaux tubes est donc à vérifier, d'autant que la réglementation a évolué, limitant l'utilisation de certains produits lubrifiants, utilisés par le passé, et que les exigences, notamment en termes de déféctologie, se sont accrues rendant l'étape de transformation d'un tube rond en un tube hexagonal encore plus délicate.

Abstract:

In the core of Sodium Fast reactor French design, the hexagonal wrapper tube is the envelope of fuel assembly. Based on past experience, i.e. in particular feedback on Phenix and SuperPhenix reactors, and news technical constraints of Generation IV, a larger HT in a more resistant material, furthermore less prone to deformation, is designed. From that point, the main question revolves around the industrial feasibility of such a tube.

Critical points in product and process should be identified and analyzed. The route, used in the past, is not available due to existing equipments which are not adapted to these bigger dimensions, like the draw machine. Moreover, regulation has changed and the using of past lubricant for the cold forming process should be limited. Finally, new methods of UT testing of a hexagonal shape should be developed to guarantee the quality of the final product (and not only the quality of the round tube like it is done before).

For all these points, the hexagonal wrapper tube for Generation IV is a real challenge to produce. So Designer, Engineering and Material Manufacturer are pools together their expertise to assure the success of this ambitious project.

Mots clefs : Mise en forme, Tubes hexagonaux, Génération IV

1 Introduction

Pour répondre aux besoins croissants en énergie et économiser les ressources naturelles en uranium, un prototype de réacteur nucléaire de IV^e génération doit être opérationnel en 2020 en France. Du fait de son expérience avec PHENIX et SUPERPHENIX, le Commissariat à l'Energie Atomique et aux Energies Alternatives (CEA) s'est notamment engagé sur un axe de recherche pour un réacteur à neutrons rapides au sodium (RNR-Na).

Les conditions en service de ce futur réacteur seront plus contraignantes que celles appliquées par le passé, principalement en termes de température de fonctionnement (augmentation de 50°C), de durée de vie (augmentation à 60 ans) et de sollicitations mécaniques. La géométrie des éléments a donc été ajustée et la nature des matériaux a évolué.

L'une des étapes de validation de ce nouveau design consiste à vérifier que les différents composants constituant le prototype peuvent être produits en conditions industrielles, tout en respectant l'ensemble des caractéristiques, notamment mécaniques, géométriques et déféctologiques, définies par les spécifications. La fabrication des tubes hexagonaux (TH), qui seront utilisés dans le cœur du réacteur pour recevoir le

combustible (figure 1), est l'un des nombreux challenges des RNR-NA de la Génération IV.

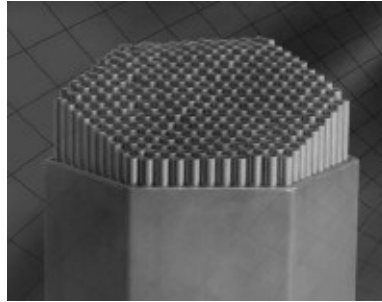


figure 1 : assemblage combustible, i.e. tube hexagonal contenant les aiguilles combustibles, pour RNR-Na

2 Les tubes hexagonaux et notamment ceux de la Génération IV

L'un des paramètres gouvernant le design d'un réacteur rapide au sodium est le taux des matériaux fissile et fertile. Il est important que ce dernier soit aussi élevé que possible. La géométrie des éléments du cœur est donc définie de sorte que la part des autres matériaux, d'échange et de structure, soit des plus réduites. C'est pourquoi les aiguilles combustibles sont enveloppées d'un tube de forme hexagonale car compacte.

D'après le cahier des charges préliminaire des TH de la Génération IV, les dimensions retenues sont plus grandes que celles des réacteurs précédents, i.e. un entreplat de l'ordre de 200 mm pour une épaisseur de 4-5 mm comparés à 124 mm et 3.4 mm pour PHENIX. De part leur utilisation, les tolérances définies pour ces produits sont faibles, i.e. $\pm 0,50$ mm sur l'entreplat intérieur et $\pm 0,40$ mm sur l'épaisseur. La rectitude à l'état final ne doit pas être supérieure à 2 mm.m^{-1} , sur ces pièces de 4 à 5 m de long.

De plus, parce que composant du cœur du réacteur, les caractéristiques du TH doivent être maintenues tout au long de son utilisation. Seules de très faibles déformations dimensionnelles, induites par les effets combinés de l'irradiation et de la température, sont admises. Aujourd'hui, la température nominale de fonctionnement est estimée entre 400° et 550°C et la dose d'irradiation visée est à au moins 150dpa, valeur dépendante de la température effective et du temps de séjour. C'est pourquoi le matériau choisi, précédemment du 316 Ti, sera remplacé par un acier de type EM10, dont la résistance est mieux adaptée mais dont la mise en forme est plus difficile (tableau 1).

	C	Ni	Ti	Si	Cr	Mo	Re (MPa)	Rm (MPa)	A (%)
316Ti	0.06	14.0	0.40	0.70	17	2.5	240	580	48
EM10	0.10	0.50	-	0.35	8.5	1.0	570	710	20

tableau 1 : analyse chimique (%) et propriétés mécaniques après traitement thermique des matériaux

3 Les filières de production de TH éprouvées par Valinox Nucléaire

Les TH de PHENIX et SUPERPHENIX (tableau 2) ont été fabriqués suivant la même filière de production.

	PHENIX	SUPERPHENIX	GEN IV
Longueur (mm)	2 500	3 600	$\approx 4 500$
Entreplat (mm)	123,7	173	≈ 206
Epaisseur (mm)	3,4	4,6	$\approx 4,5$
Nuances	316 Ti – 316 L – EM10	316 Ti – EM10	Type EM10

tableau 2 : caractéristiques des TH de PHENIX et SUPERPHENIX

La gamme de fabrication des TH est schématisé en figure 2. Après l'étape de filage à chaud, la section des tubes était réduite en deux fois par étirage. Cette même technologie permettait ensuite le passage de la forme

ronde à la forme hexagonale, les dimensions finales, ainsi que les caractéristiques mécaniques, étant obtenues grâce à une ultime passe d'étirage hexagone-hexagone.

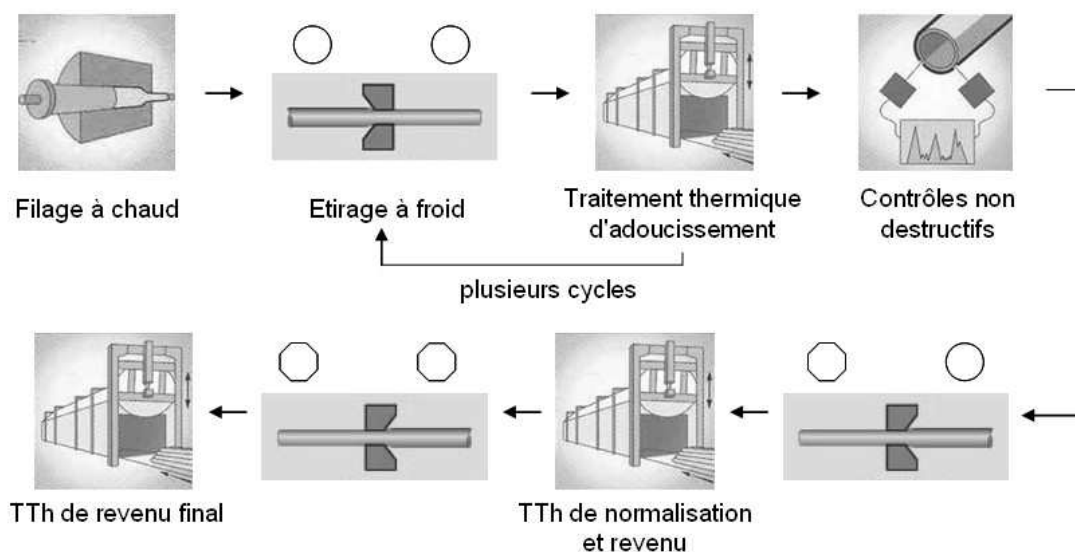


figure 2 : gamme de fabrication des TH

Les contraintes de déformation étant importantes, jusqu'à plus de 35 % d'écrouissage, l'étirage était pratiqué sous oxalation. En effet, la conversion chimique est couramment utilisée comme support de lubrifiants dans la déformation à froid (tréfilage, frappe à froid, étirage, extrusion).

Pour rendre le métal déformable après chaque étape de réduction de section, des traitements thermiques de recuit, combinés à du dressage, étaient réalisés, sous vide à 750°C pendant environ 1h. Avant la dernière passe d'étirage, les TH subissaient deux traitements sous vide, au maintien de 30 minutes suivi d'un refroidissement de quelques degrés par minute, l'un de normalisation 1000°C, l'autre de revenu, à 750°C. Au final, après une réduction de section d'une vingtaine de pourcent, un dernier revenu sous vide permettait l'obtention d'une structure homogène telle qu'illustrée en figure 3.



figure 3 : structure finale d'un TH en EM10

Pour des raisons de complexité de la géométrie, le contrôle de santé des produits était réalisé sur tube rond, soit avant la formation de l'hexagone. Le défaut ne devait pas excéder 5 % de l'épaisseur du TH. Différents essais, réalisés par le fabricant, permettaient de déterminer les caractéristiques des produits telles que les résistances élastique et à la rupture ou la grosseur de grain.

4 Quelques étapes critiques de la fabrication des TH de Génération IV

De part ses caractéristiques, ce nouveau TH ne pourra être produit à partir de la même gamme de fabrication que les tubes de PHENIX et SUPERPHENIX. C'est à partir des rapports de fabrication des TH précédents que VN a pu dégager quelques points sensibles tels que les trois exemples ci-après.

4.1 Le filage

La première transformation de la matière était une opération de filage. Or, d'après les rapports d'étirage, les capacités des presses actuelles sont insuffisantes, car les diamètres maximum autorisés en entrée de filière sont inférieurs à ceux qui seraient nécessaires à la production de ces grands TH.

Deux possibilités principales peuvent permettre de palier ce manque de moyen de production mais chacune d'elles nécessite de vérifier certains aspects.

D'une part, il est possible d'éliminer une étape d'étirage rond-rond, ce qui diminuerait le diamètre du rond en entrée de filière. Cependant la qualité, notamment en termes d'homogénéité de la déformation et de répartition de la matière, pourrait se dégrader et générer une augmentation de produits rebutés. Des développements, concernant les paramètres de filage et/ou les étapes intermédiaires, seraient alors nécessaires pour limiter les pertes de fabrication.

D'autre part, le tube rond pourrait être obtenu par laminage à chaud. Cette technologie n'est toutefois pas fiabilisée dans le cas de faible rapport entre l'épaisseur et le diamètre. La qualité des produits pourrait ne pas correspondre aux spécifications et donc nécessiter des recherches de caractérisation et d'optimisation de la défectologie.

4.2 La transformation en hexagone

La transformation d'un tube rond en un tube de forme hexagonale était obtenue par étirage à froid. Les niveaux de déformation étant importants, cette passe était réalisée sous oxalation, une technique de lubrification performante mais qui nécessite le recours à des produits polluants. Le respect de l'environnement est incompatible avec cette préparation de surface utilisée par le passé.

Pour garantir la faisabilité de la transformation du rond en hexagone sans détérioration de la qualité du produit, i.e. absence de griffures, arrachements... en peaux interne et externe, différentes solutions sont envisageables.

En premier lieu, l'utilisation d'ultra-sons pourrait assister un lubrifiant moins performant, mais 'propre', lors de cette opération délicate, notamment dans les angles du TH. Aucune étude ne permet toutefois aujourd'hui de garantir l'efficacité d'une telle association.

Il est également possible d'avoir recours à d'autres moyens de déformation que l'étirage à froid. Le laminage à froid, le martelage voire le dressage sont autant de technologies qui peuvent être candidates mais des validations en grandeur nature seront indispensables afin de s'affranchir des problèmes de changement d'échelle.

4.3 Le contrôle des produits finis

Lors de la production des précédents TH, les connaissances appliquées aux contrôles non destructifs ne permettaient de rechercher les défauts que sur tubes ronds, i.e. avant les dernières étapes de transformation. Du fait de l'encombrement des capteurs, l'inspection, notamment dans les angles des TH, n'était pas réalisable, du fait de leur faible rayon de courbure où les CF et US se comportent différemment en fonction des différents points de cette zone. Selon le principe de sûreté, la vérification des pièces finies est aujourd'hui incontournable. La technologie existe et demande à être adaptée et validée. Le risque de production se situe au niveau des spécifications. Actuellement, aucune donnée liée à la défectologie des TH finis de PHENIX ou SUPERPHENIX, i.e. aucune connaissance sur l'impact de l'étape d'obtention de l'hexagone, n'est disponible. Il devient dès lors difficile de définir des seuils d'acceptabilité permettant la réalisation des produits.

5 Un partenariat Concepteur/Assembleur/Fabricant

Les défis à relever pour réaliser les réacteurs de Génération IV sont d'importance et les points d'interrogation nombreux, le tube hexagonal n'étant qu'un exemple. Un groupe de travail composé d'experts dans un large ensemble de domaines a donc été créé dès les premières phases du projet.

De fait, il est indispensable que les équipes des différents intervenants, i.e. concepteur, assembleur et fabricant, partagent leurs savoir et savoir-faire afin de définir des composants répondant à la majorité des demandes et contraintes.

A partir de l'analyse et de la comparaison des spécifications actuelles, des gammes passées et des rapports de

fabrication, l'équipe détermine les points critiques relatifs au produit et aux étapes de fabrication. Pour chaque point, des alternatives sont proposées, détaillées et complétées par une analyse des risques. Des essais, en laboratoire ou sur site industriel, peuvent être planifiés pour aider à définir la meilleure solution. En dernier recours, une révision du design du cœur du réacteur pourrait être envisagée.

6 Conclusion

Différentes interrogations subsistent encore concernant la fabrication du tube hexagonal actuellement défini pour les réacteurs de Génération IV. Un groupe d'experts travaille pour y répondre. Fort de son retour d'expérience sur la fabrication des précédents TH, Valinox Nucléaire participe à ces réflexions en amont. Plusieurs études sont à l'ordre du jour afin de déterminer la gamme de production la mieux adaptée à ce produit de grandes exigences.