

Démarche utilisée par Creusot Forge pour l'amélioration des gammes de fabrication de ses pièces

G. GIRARDIN^a, O. MAHDAOUT^b, I. POITRAULT^b, D. BOQUET^a, D. JOBARD^a, F. PERDRISSET^a

a. AREVA SFARSTEEL Creusot Forge, 56 rue Clémenceau, BP 112, 71203 LE CREUSOT

b. ARCELORMITTAL Industeel France, 56 rue Clémenceau, BP 19, 71201 LE CREUSOT

Résumé :

Depuis de nombreuses années, Creusot Forge s'est tourné vers la modélisation afin d'améliorer et de développer ses gammes de forgeage. Les récentes évolutions du logiciel FORGE[®] ont permis à Creusot Forge de développer une approche originale de simulation de ses opérations de forgeage et de traitement thermique visant à garantir la qualité attendue de ses produits. Face au renouveau des programmes nucléaires civils et au développement de centrales de nouvelle génération de type EPRTM cette démarche a été largement utilisée en s'appuyant non seulement sur 40 années de savoir-faire mais aussi sur une parfaite connaissance métallurgique de ses lingots.

Abstract :

Since many years, Creusot Forge has come to modeling to improve and enhance its forging program. The latest improvement of FORGE[®] software allows to developing innovative modeling approach to optimize both forging and heat treatment processes to comply with the requirements of manufacturing parts. To face the rebirth of nuclear industry and the development of new generation plants, EPRTM type, such approach, supported by 40 years of expertise and a perfect knowledge of the metallurgical quality of its ingots, has been widely used.

Mots clefs : Plaque tubulaire, modélisation plasticine, simulation numérique

1 Introduction

Depuis le début de l'aventure nucléaire, il y a maintenant 40 ans, Creusot Forge a livré des pièces pour plus de 100 réacteurs à travers le monde. Dans un secteur où la sûreté est la préoccupation principale, Creusot Forge s'est donc engagé dans une démarche de maîtrise de la qualité de ses produits. Dans cette optique, des pièces industrielles ont, régulièrement, été découpées et caractérisées tant d'un point de vue métallurgique que mécanique. Parallèlement, une démarche a été mise au point pour optimiser la qualité de ses produits. Cette démarche, continuellement améliorée, consiste à établir une chaîne de modèles capable de prévoir, en fonction des opérations de fabrication telles que la coulée, le forgeage et le traitement thermique, les caractéristiques importantes (taux de ségrégation, sens principal du fibrage...) des pièces destinées au secteur du nucléaire. Ce document présente l'évolution de la méthodologie développée par Creusot Forge depuis les années 80 en appliquant les derniers développements de cette approche au cas d'une plaque tubulaire.

2 Présentation du composant

Au sein de l'îlot primaire d'un Réacteur à Eau sous Pression (REP), le générateur de vapeur assure le transfert de chaleur entre le milieu primaire, chauffé au contact du cœur, vers le fluide secondaire et, de facto, constitue une barrière de confinement de la radioactivité entre les deux circuits. Un générateur de vapeur est constitué d'un faisceau de tubes sertis par dudgeonnage à la plaque tubulaire sur laquelle est soudée la plaque de partition qui sépare le fluide caloporteur primaire entrant de l'eau refroidie après passage dans les tubes (FIG. 1). La plaque tubulaire, réalisée en acier au carbone faiblement allié, est donc une pièce maîtresse du générateur de vapeur. C'est pourquoi, dans le cadre d'un programme de recherche conduit au cours des années 80 par le Centre de Recherche des Matériaux du Creusot (CRMC) d'Industeel et AREVA (anciennement Framatome), une plaque tubulaire du palier 1300 MWe a fait l'objet d'une caractérisation métallurgique et mécanique. La gamme de fabrication ainsi que les résultats des caractérisations métallurgiques sont présentées dans les paragraphes 2.1 et 2.2.

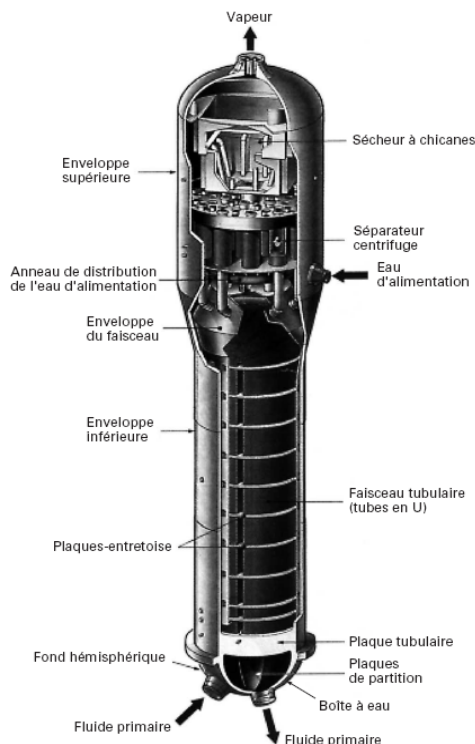


FIG. 1 – Plan d’un Générateur de Vapeur [1]

2.1 Gamme de fabrication

La plaque tubulaire de cette étude a été fabriquée à partir d’un lingot conventionnel de 135 tonnes en nuance 16MND5 dont l’analyse chimique est donnée dans le Tableau 1.

C	S	P	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	V	Cu	Sn	Al	As
0.159	0.0008	0.008	0.205	1.3	0.765	0.22	0.48	0.009	0.069	0.006	0.035	0.021

Tableau 1 : Composition chimique en % massique

La gamme de forgeage est schématisée dans la figure ci-après. Elle comporte une phase de bloomage et de chutage de la tête et du pied du lingot, suivie d’un écrasement entre plaques et de 3 phases successives d’écrasement en passes parallèles. Elle se termine par un double coup de marteau qui permet d’approcher le profil final de la pièce.

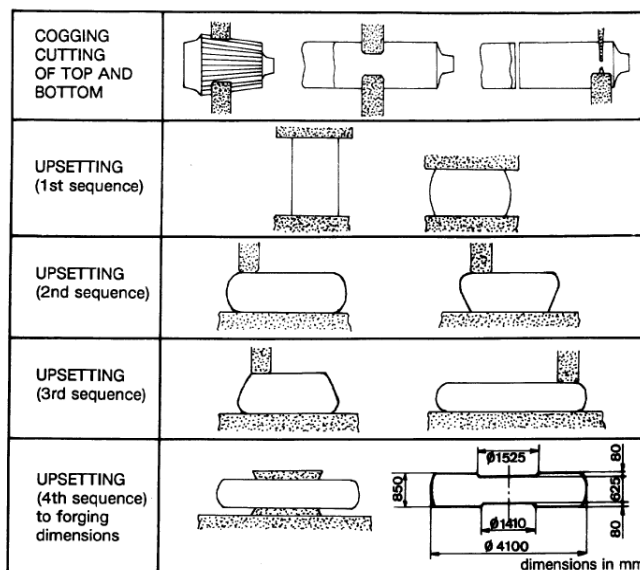


FIG. 2 - Gamme de Forgeage de la Plaque Tubulaire [2]

Au forgeage, succèdent des opérations de traitement thermique, de contrôles dimensionnels, de contrôles non destructifs et d'usinage. Au stade final, une tranche axiale a été découpée pour étudier les propriétés métallurgiques et mécaniques en tous points de la plaque.

2.2 Caractérisation Métallurgique

Des analyses chimiques sur la tranche axiale ont permis de tracer la macro-ségrégation du carbone (FIG. 3) sur la pièce. Elle se caractérise par :

- une zone de ségrégation positive (> 30%) dans la région axiale tête,
- une zone de ségrégation négative en pied,
- une large zone périphérique ne présentant que peu ou pas de ségrégation du carbone.

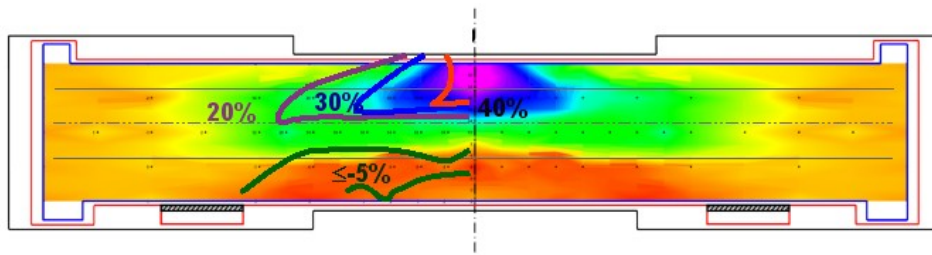


FIG. 3- Tracé manuel des iso-taux de ségrégation du carbone sur pièce

Les examens macro et micrographiques effectués ont montré que la structure de la plaque est entièrement bainitique en peau et dans les attentes de soudage. Les caractéristiques mécaniques ont été mesurées en sens radial et travers ; elles sont largement supérieures aux impositions en tous points de la pièce.

3 Démarche de modélisation

3.1 Approche historique

En 1987, Creusot Forge s'est orientée vers la modélisation des gammes de fabrication en investissant dans un atelier de forgeage à échelle réduite basé sur l'utilisation de la plasticine à la place de l'acier et dans un outil de simulation numérique 2D FORGE2[®]. A cette époque, la gamme de forgeage de la plaque tubulaire a été modélisée avec ces 2 outils [2, 3].

A noter qu'en parallèle, des études ont été lancées dans les Ecoles des Mines de Nancy et de Paris (Cemef) pour établir des modèles numériques permettant de prévoir la solidification des gros lingots [4, 5].

3.1.1 Etude plasticine

La simulation plasticine consiste à déformer une pâte à modeler (plasticine) avec une maquette à échelle réduite de l'outillage réel (échelle 1/25^{ème} à Creusot Forge), en appliquant les règles de similitude des systèmes physiques pour les matériaux et pour les conditions aux limites. Une technique de marquage permet de calculer les déformations et les écoulements au cours des différentes phases de la mise en forme.

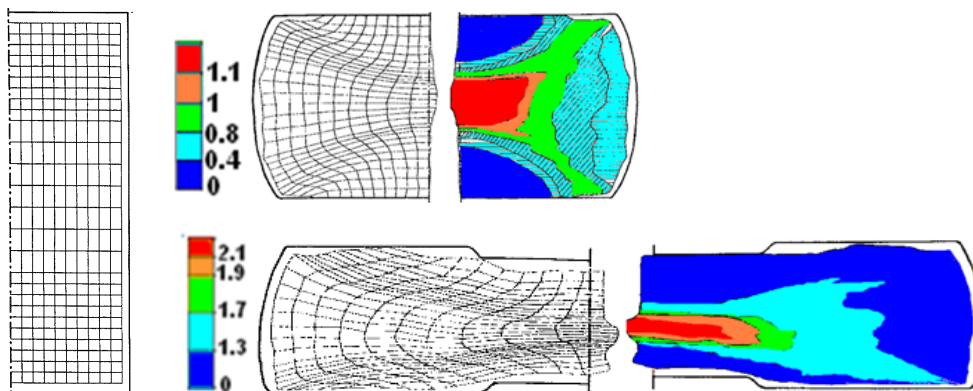


FIG. 4 - Etude plasticine : Grille initiale, écoulements et déformations locales après écrasement entre plaques et écrasement final

3.1.2 Forge 2D

FORGE2[®] est un logiciel de simulation numérique de la mise en forme des matériaux. Il permet de prévoir l'évolution de la géométrie de la pièce, de la déformation en tous points et des efforts sur les outils tout au long du processus de forgeage. Il ne s'applique qu'aux gammes de forgeage pouvant être simulées en 2D axi-symétrique ou en 2D plan. Des simplifications ont donc été faites pour simuler l'écrasement en passes parallèles opération relevant typiquement du 3D. La comparaison des FIG. 4 et FIG. 5 mettent nettement en évidence la similitude des résultats entre plasticine et numérique au stade écrasement entre plaques. Par contre, pour l'écrasement aux cotes finales qui n'est plus axi-symétrique, les résultats de FORGE2[®], ne sont pas corrects.

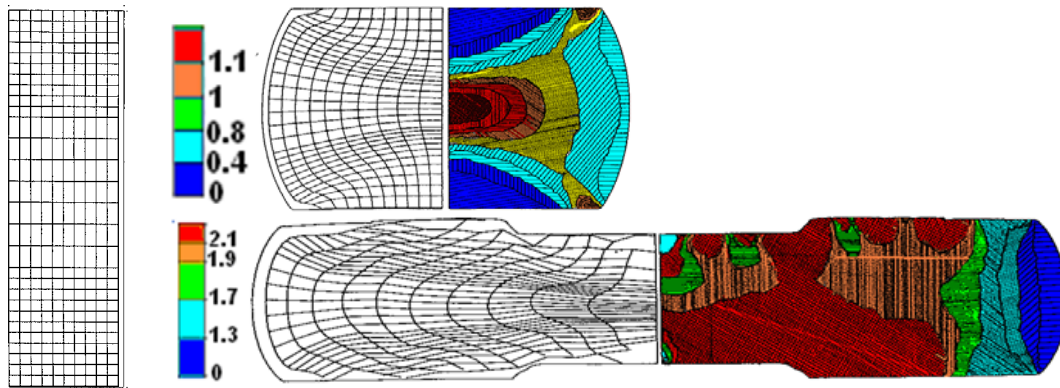


FIG. 5 – Résultats du calcul FORGE2 : Grille initiale, écoulements et déformations locales après écrasement entre plaques et écrasement final de la plaque tubulaire [3].

3.2 Nouvelle Approche

A partir des années 2000, comme chez la majorité des forgerons français, la modélisation par matériau modèle a été peu à peu abandonnée au profit de la modélisation numérique 3D (logiciel FORGE[®] [6]). En effet, la modélisation par matériau modèle, bien que très performante présente des inconvénients non négligeables tels que :

- dispersions pouvant apparaître au cours de chacune des étapes de modélisation (précision des expériences dues à l'échelle utilisée, comportement mécanique de la plasticine, digitalisation des positions des points de référence du maillage...),
- non prise en compte de la thermique dans le procédé,
- temps de mise en œuvre long.

La simulation numérique 3D l'a remplacé, permettant de prendre en compte l'aspect thermique du forgeage et les traitements thermiques, et donc de prévoir plus précisément, non seulement l'aspect mécanique du procédé, mais aussi l'aspect métallurgique. Ainsi, en 2010, la simulation de la gamme de forgeage et de traitement thermique de la plaque tubulaire a été réalisée avec le logiciel 3D FORGE[®].

3.2.1 Simulation du forgeage

Données de modélisations

Pour la simulation de la gamme de forgeage, plusieurs conditions ont été retenues :

- Loi de comportement pour la nuance 16MND5 utilisée de type Norton-Hoff,
- Frottement régi par une loi de Coulomb limité Tresca (CLT),
- Pilotage des opérations de forgeage en vitesse de descente de la presse.

Géométrie

Les résultats géométriques des différentes opérations sont présentés dans la FIG. 6 ci-après.

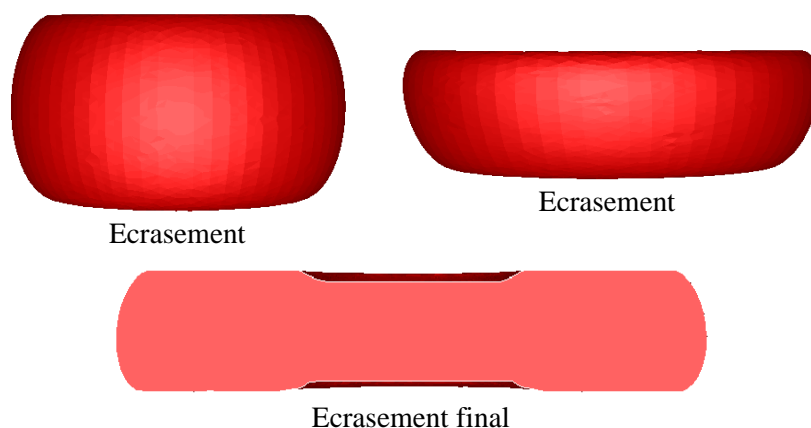
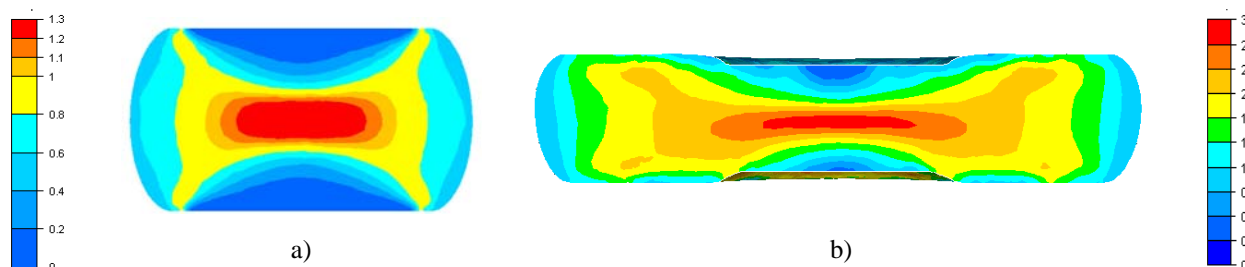


FIG. 6 – Résultats de simulation de la gamme de Forgeage de la Plaque Tubulaire

Les dimensions obtenues par simulation sont très proches de celles indiquées dans les relevés de la gamme de forge (écart de l'ordre de 2%) et du contrôle dimensionnel final. Ce résultat permet de valider les simulations sur le plan dimensionnel de la pièce.

Déformation

La FIG. 7 présente la déformation généralisée depuis l'écrasement entre plaques jusqu'à la dernière opération d'écrasement aux cotes de forge.

FIG. 7 – Iso-valeurs de déformation équivalente (ϵ) : a) Après écrasement entre plaques b) en fin de forgeage

A la fin de l'écrasement entre plaques, les iso-déformations sont identiques entre les deux versions de FORGE. Le maximum de déformation est localisé au cœur de la pièce (déformation supérieure à 1,3). A la fin du forgeage, la valeur minimale de déformation, située dans les zones axiales en faces supérieure et inférieure, est de 0,3 alors que la valeur maximale (2,9) est localisée à cœur. Si nous comparons ces résultats à ceux obtenus en plasticine, nous observons une très bonne corrélation entre les valeurs obtenues.

3.2.2 Suivi des données métallurgiques

A partir de la définition des iso-taux de carbone du lingot initial [3], il est possible de suivre l'évolution de ces lignes d'iso-ségrégations au cours des opérations de mise en forme et de déterminer leur localisation sur le profil de la pièce pour traitement thermique. La FIG. 8 présente le profil des iso-taux de ségrégation du carbone sur la pièce brute de forge obtenue par simulation et sur le profil de la plaque tubulaire tel qu'usiné avant traitement thermique dit de qualité (TTQ).

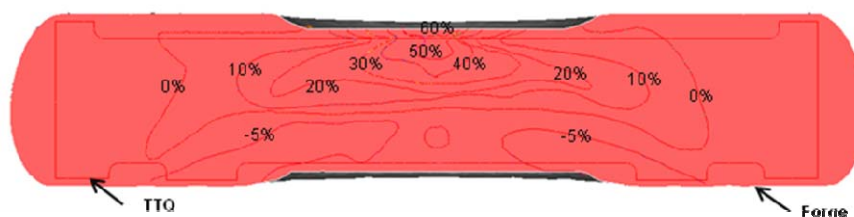


FIG. 8 – Tracé des iso-taux de ségrégation du carbone sur pièce brute de forge (Forge) et sur le profil avant Traitement Thermique de Qualité (TTQ) obtenu par simulation.

3.2.3 Modélisation des traitements thermiques

Le logiciel permet de prendre en compte les transformations de phases à l'état solide, en se basant sur le diagramme TTT (Température, Temps, Transformation) de la nuance. Il est ainsi possible, par exemple, de modéliser la trempe à l'eau lors du traitement thermique de qualité, et de prévoir la structure obtenue en fonction des vitesses de refroidissement. La FIG. 9 montre que la surface de la pièce est totalement bainitique, comme les examens métallographiques l'ont montré précédemment.

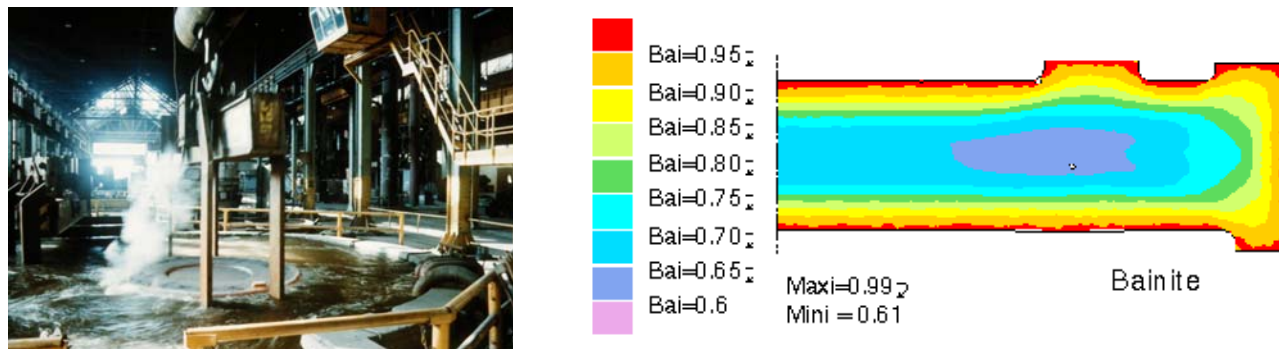


FIG. 9 – Trempe à l'eau de la plaque tubulaire et iso-valeurs de bainite après trempe obtenues à l'aide du logiciel FORGE®

4 Conclusion

Les évolutions des outils de simulation numérique permettent dorénavant de remplacer avantageusement les autres techniques pour l'étude des gammes de fabrication des pièces forgées de haute qualité depuis l'élaboration jusqu'au traitement thermique de qualité. Ces outils permettent d'identifier quantitativement des grandeurs thermomécaniques de première importance (déformations et contraintes locales, vitesses de refroidissement, structure métallurgique) depuis la première opération de forgeage jusqu'à l'opération de traitement thermique et ce, en tout point de la pièce. La simulation numérique des procédés s'est donc non seulement imposée comme un outil indispensable pour la meilleure caractérisation des pièces de forge mais aussi pour le développement de ses gammes de fabrication dans le souci constant de garantir la qualité attendue des produits forgés. La simulation permet aussi de tester rapidement l'influence de différents paramètres de fabrication sur une gamme de forgeage donnée et, ainsi, de pouvoir la faire évoluer. Ces approches, bien que répondant parfaitement aux besoins actuels de Creusot Forge, devront encore être améliorées dans les années à venir afin de pouvoir mieux prendre en compte les couplages micro-macro tant au niveau de la prévision des caractéristiques métallurgiques que mécaniques de pièces de forge.

References

- [1] J.P. Thomas, C. Cauquelin, Construction des centrales REP – Equipements Primaires, Techniques de l'Ingénieur, BN 3 270.
- [2] A. Le Floch, E. Wey, S. Jacomet, J. Pisseloup, I. Poitault, P. Bocquet, Deformations estimate of an open die forged heavy disc and comparison with an industrial one, TMS AIME, 116 th Annual Meeting, Denver, USA, 02/1987
- [3] I. Poitault, J. Pisseloup, G. Pont, E. Wey, R. Ducloux, Improved metallurgical and mechanical properties through simulation of forging process, 12th International Forgemasters Meeting, Chicago, Illinois, USA, September 11-16, 1994.
- [4] F. Roch, H. Combeau, I. Poitault, J.Ch. Chevrier, G. Lesoult, Numerical model for prediction of chemical, type segregation in heavy steel ingots", 6th International Iron and Steel Congress - Nagoya - 21/26 October 1990
- [5] H. Combeau, F. Roch, I. Poitault, J. Ch. Chevrier, G. Lesoult, Numerical study of heat and mass transfer during solidification of steel ingots, 1st Int. Conf. on Advanced Computational Methods in Heat Transfer - Southampton - 17/19 July 1990.
- [6] J.L. Chenot, Développement du logiciel FORGE3 en collaboration avec l'industrie, La Forge, n°42, 2010.