

Influence des macro-hétérogénéités sur la déformation résiduelle des composants en 18MnNiMo-5

V. OPTASANU^a, D. COTTON^a, J.-B. MINNE^a, T. MONTESIN^a, D. JOBARD^b

a. Laboratoire Interdisciplinaire Carnot de Bourgogne (ICB) UMR 6303 CNRS - Université De Bourgogne, 9 Av. Alain Savary, 21078 DIJON Cedex (FRANCE)

b. AREVA Creusot Forge, 56 Rue Clémenceau, BP 112, 71203 LE CREUSOT Cedex (FRANCE)

Résumé :

Lors de l'obtention de lingots utilisés pour la fabrication de grosses pièces forgées, des macro-hétérogénéités de composition chimique apparaissent inévitablement car elles sont inhérentes au processus de fabrication. L'objet de cette étude est de présenter les travaux de caractérisation d'une nuance d'acier utilisée dans l'industrie nucléaire civile, le 18MnNiMo-5, du point de vue métallurgique, mécanique et thermique et d'exposer les résultats de l'implémentation de ces données dans le logiciel de simulation FORGE[®]. La caractérisation a permis de quantifier la dépendance des propriétés mécaniques, thermiques et métallurgiques avec la température, la composition phasique et la composition chimique. La simulation numérique nous a permis d'évaluer l'importance de la présence des macro-hétérogénéités de composition chimique vis-à-vis de la déformation résiduelle à la suite d'un procédé de trempe simulée sur une pièce à l'échelle 1. On montre ainsi qu'une distribution non-axisymétrique des zones enrichies en éléments chimiques d'addition peut générer des ovalisations.

Abstract :

During the processing of ingots used for the manufacture of large metal parts, chemical macro-heterogeneities inevitably appear, as they are inherent in the manufacturing process. The purpose of this study is to present various procedures used to characterize a grade of steel used in the civil nuclear industry, 18MnNiMo-5, in terms of metallurgical, mechanical and thermal properties and to present the results of the implementation of these data in the simulation software FORGE[®]. The characterization was used to quantify the dependence of mechanical, thermal and metallurgical properties with respect to temperature, phase composition and chemical composition. The simulation allowed us to assess the importance of the presence of chemical macro-heterogeneities on the macroscopic residual deformation by simulating the quenching process at scale 1. It is shown that asymmetric distribution of chemical enriched zones may generate ovalities.

Mots clefs : changement de phase, 18MND5, caractérisation, modélisation, trempe

1 Introduction

L'un des objectifs du programme ANR THERMIDE [1] qui s'est achevé en 2012 a été d'optimiser le procédé de fabrication des composants métalliques par une meilleure maîtrise des mécanismes de déformation d'origine « métallurgique ». La mise en forme de pièces métalliques de grandes dimensions est un processus complexe qui nécessite plusieurs types de procédés industriels allant de la coulée de lingots à l'usinage de finition en passant par des étapes de forgeage et traitement thermique. Dans un souci d'amélioration de la qualité de ses produits et de la maîtrise de son procédé de fabrication, les fabricants doivent développer une démarche d'optimisation du dimensionnement des pièces à l'aide de la simulation numérique par éléments finis, en particulier pour maîtriser les effets des traitements thermiques. Afin d'être complète, cette démarche doit intégrer l'ensemble des résultats du traitement thermique (microstructures, contraintes et déformations résiduelles).

L'étude présentée ici porte sur la caractérisation physico-chimique, métallurgique et mécanique du matériau et sur la modélisation du procédé de trempe, effectuée à l'aide du logiciel FORGE, afin d'obtenir une évaluation des déformations d'origine thermique et métallurgique des pièces de grandes dimensions.

Le matériau utilisé dans cette étude est le 18MnNiMo-5. Nous présenterons ici le cas des pièces de grandes dimensions utilisées entre autres dans la fabrication de viroles de générateurs de vapeurs pour réacteurs nucléaires civils. Le procédé d'obtention de telles pièces peut-être défini comme une suite d'opérations successives. Le lingot initial peut-être de géométrie cylindrique pleine ou creuse. Nous parlerons ici de ce dernier cas. La mise en forme mécanique de la pièce comporte une succession d'étapes de chauffe suivies de forgeage à chaud afin d'atteindre les dimensions d'une pièce proches de la pièce finie. Un ou plusieurs traitements thermiques finaux et usinages assurent l'obtention des dimensions et des propriétés mécaniques définitives de la pièce. Une compréhension des phénomènes pouvant générer des déformations résiduelles de la pièce pendant les dernières étapes de traitement thermique est importante pour la maîtrise des surépaisseurs à enlever par usinage.

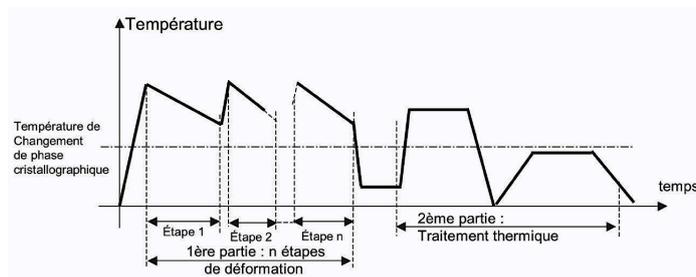


FIG. 1. – Schéma de principe d'un cycle de mise en forme d'un acier à changement de phase

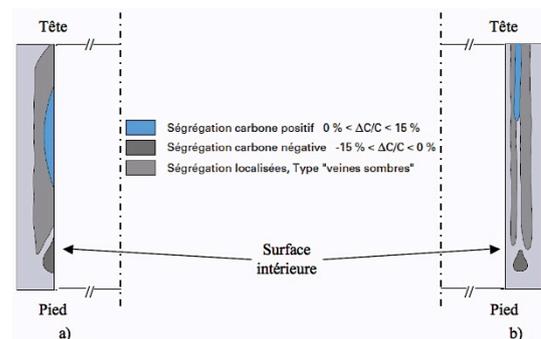


FIG. 2. – Ségrégations dans les viroles [2] obtenues à partir a) d'un lingot plein et b) d'un lingot creux.

Pendant le processus d'obtention d'un lingot creux, en raison de sa forte épaisseur, une inévitable ségrégation se produit. Ainsi, comme indiqué dans la figure 2 b) une ségrégation positive peut apparaître dans les régions de la partie supérieure à mi épaisseur du lingot creux alors que la partie inférieure connaît une ségrégation négative [2]. De par le fait que les extrémités du lingot sont enlevés durant le processus de mise en forme, on retrouve le matériau nominal en pied de lingot alors qu'on tête de lingot on trouve un matériau enrichi en éléments d'addition. Nous allons dans ce travail nous concentrer sur les effets de la non-homogénéité des propriétés sur les déformations finales lors d'un traitement de trempe. Une distribution non-axisymétrique de la macro-ségrégation qui peut apparaître suite au procédé de forgeage peut générer des déformations résiduelles macroscopiques lors de la trempe en raison du changement de phase qui peut intervenir de manière différente en fonction du taux d'éléments ségrégués.

2 Caractérisation du matériau

Afin d'obtenir les paramètres nécessaires à la modélisation thermo-mécano-métallurgique du procédé de trempe, une caractérisation exhaustive des paramètres influant ce traitement a été réalisé. Ainsi, nous avons caractérisé les données suivantes, relatives pour certaines aux différentes phases susceptibles d'être présentes au sein du matériau considéré dans cette étude (austénite, ferrite, bainite).

Type de données	Nombre de phases	Importance
Températures caractéristiques	-	10
Courbe TTT	3	10
Données thermo-physiques	3	8
Fraction maximale formée	3	8
Cinétique croissance	3	8
Facteur incubation Bainite	1	8
Chaleur latente	3	8
Loi rhéologique	3	5
Module d'Young	3	5
Coefficient dilatation	3	5
Dilatation au changement de phase	3	5
Dureté	3	5

Tableau 1. Liste des paramètres mesurés et leur degré d'importance sur les résultats d'un calcul en trempe.

Un ordre d'importance relatif (10 représente le plus important) a été attribué à chaque paramètre.

La caractérisation a été faite sur les 6 types d'échantillons identifiés dans le Tableau 2 dénommés comme dans le Tableau 2 [3]. Ainsi, est distingué le matériau de composition nominale (pied de lingot) de celui de composition enrichie (tête de lingot). Pour chaque composition analysée trois mélanges phasiques sont considérés.

Pied de lingot	Tête de lingot
Bainite 100%	Bainite 100%
Bainite 85 % Ferrite 15 %	Bainite 85 % Ferrite 15 %
Bainite 50% - Ferrite 50 %	Bainite 50% - Ferrite 50 %

Tableau 2. Classes d'échantillons testés avec composition phasique et lieu de prélèvement par rapport au lingot initial de coulée.

2.1 Caractérisation physico-chimique du matériau

La diffusivité thermique des différentes classes d'échantillons a été caractérisée par flash laser selon la norme ASTM E-1461 sous basse pression d'azote et argon, entre la température ambiante et 1200°C. Les échantillons ont été recouverts de graphite pour améliorer l'absorption du flash et augmenter l'émissivité de la surface.

La capacité thermique massique a été déterminée par calorimétrie différentielle (DSC) selon les normes ASTM-C35. Les échantillons testés ont une masse d'environ 37 mg. Les mesures ont été réalisées sous flux d'argon (débit : 50 mL/min). Les échantillons ont été analysés entre la température ambiante et 1200°C à une vitesse de chauffage de 20 K/min. La conductivité thermique est déduite de la formule :

$$\lambda = \rho \cdot Cp \cdot \alpha \quad (1)$$

avec λ : conductivité thermique ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$), Cp : capacité thermique massique ($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$), α : diffusivité thermique ($\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$) et ρ : masse volumique ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)

La figure 3 présente la variation de la conductivité et de la capacité avec la température. Les écarts dans les valeurs de capacité thermique et de conductivité étant très faibles en fonction de la composition phasique nous avons considéré dans la suite, la même valeur pour la ferrite et la bainite.

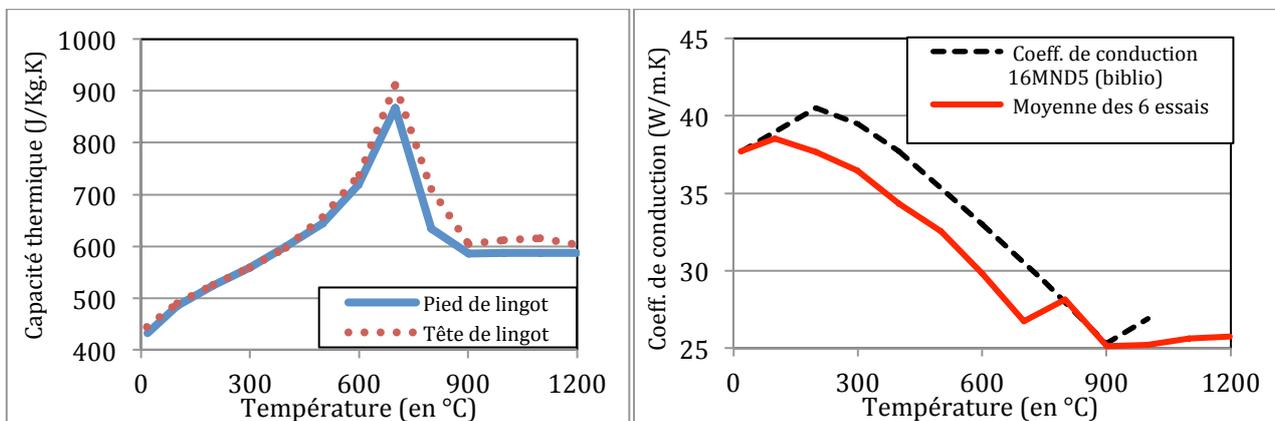


FIG. 3. – Comparaison entre les résultats des caractérisations : Cp à gauche et λ à droite (et comparaison avec les données bibliographiques [4] du 16MnNiMo-5)

L'enthalpie de transformation a été mesurée également par calorimétrie différentielle. Les différentes valeurs obtenues pour les six classes d'échantillons ont permis de déduire, par la loi des mélanges et en tenant compte du pourcentage phasique, l'enthalpie de transformation de la ferrite et de la bainite pour chaque composition chimique (Tableau 3).

	Enthalpie ferrite ($\text{J}\cdot\text{m}^{-3}$)	Enthalpie bainite ($\text{J}\cdot\text{m}^{-3}$)
Pied de lingot	2,7881E+08	3,4248E+08
Tête de lingot	2,5064E+08	3,1682E+08

Tableau 3. Enthalpies de formation des phases

2.2 Caractérisation métallurgique du matériau

Dans le cadre de cette étude les diagrammes TTT du matériau de base (pied de lingot) et du matériau enrichi (tête de lingot) ont été réalisés par trempes étagées en bain de sels fondus et analyse microscopique. Ces paramètres ont été pris en compte pour la modélisation ultérieure des processus de mise en forme avec le logiciel Forge. La figure 4 présente le diagramme TTT du matériau de base. Le matériau enrichi en éléments d'addition (tête de lingot) met en évidence un décalage vers la droite des courbes du TTT, en concordance avec la théorie [5].

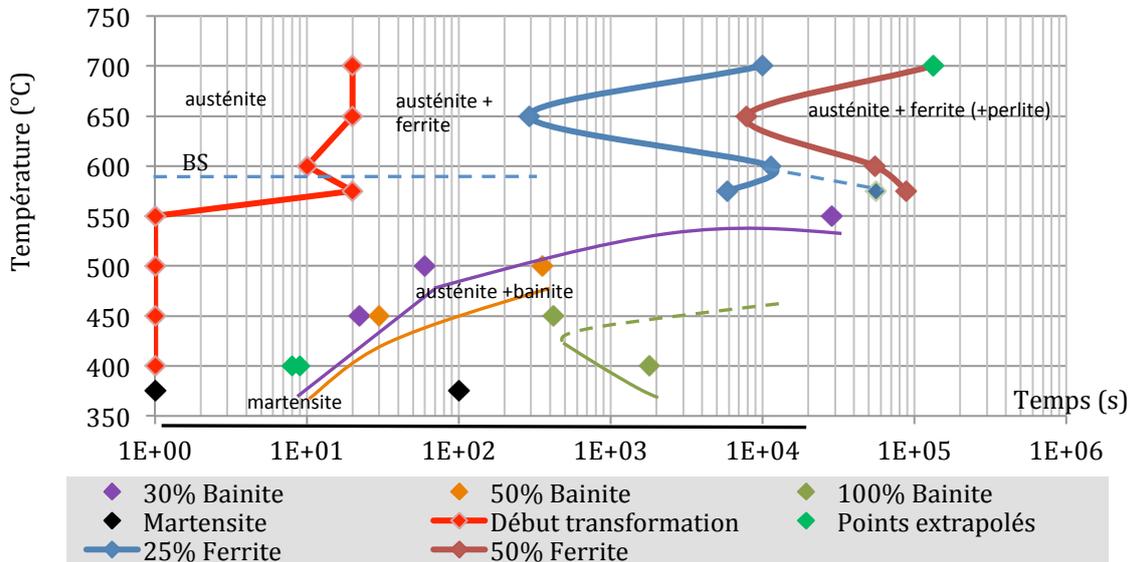


FIG. 4.– Diagramme TTT mesuré pour le 18MnNiMo-5 nominal (pied de lingot).

Les températures caractéristiques (présentées pour la matière nominale dans le tableau 4), ont été déterminées par dilatométrie. Il en a été de même pour la masse volumique, les coefficients de dilatation et les variations volumiques dues aux changements de phase.

AC1	AC3	AR1	AR3
717	816	641	691

Tableau 4. Températures caractéristiques (°C) pour le 18MnNiMo-5 nominal

2.3 Caractérisation rhéologique du matériau

Un des buts de l'étude expérimentale est d'obtenir les paramètres rhéologiques à introduire dans le logiciel Forge. Dans ce logiciel la loi rhéologique utilisée est le modèle de type Bingham généralisé :

$$\sigma_0 = \sigma_{00} + H\varepsilon^n + K\dot{\varepsilon}^m$$

Une analyse des courbes expérimentales de traction a été menée afin d'en extraire les paramètres rhéologiques en fonction de la température. Nous présentons uniquement les résultats concernant les échantillons "100% bainite", car dans l'étude numérique décrite ici le domaine bainitique est prépondérant.

Les courbes de traction ont été réalisées selon la norme NF-EN-1002-5 à une vitesse de la traverse qui correspond à une vitesse de déformation de 0,5% / min jusqu'à une valeur de déformation de 1,6% puis continuée à 20% / min jusqu'à la rupture. La courbe présentée figure 5 montre une comparaison entre une courbe de traction à 500°C et le modèle rhéologique déterminé pour cette courbe. On remarque une bonne approximation de la courbe expérimentale avec le modèle, avant l'apparition de la striction. Ainsi, pour chaque essai expérimental, nous avons déterminé un jeu de paramètres rhéologiques. Ainsi, en analysant graphiquement la distribution des paramètres en fonction de la température il ressort que la dépendance peut être approximée par une sigmoïde d'équation générale [6]:

$$Param\grave{e}tre(T) = \frac{A}{1 + e^{B(T+C)}} + D \tag{1}$$

dans laquelle *Paramètre* représente σ_{00}, H, n, K ou m et les coefficients A, B, C, D sont à déterminer par corrélation avec les résultats expérimentaux.

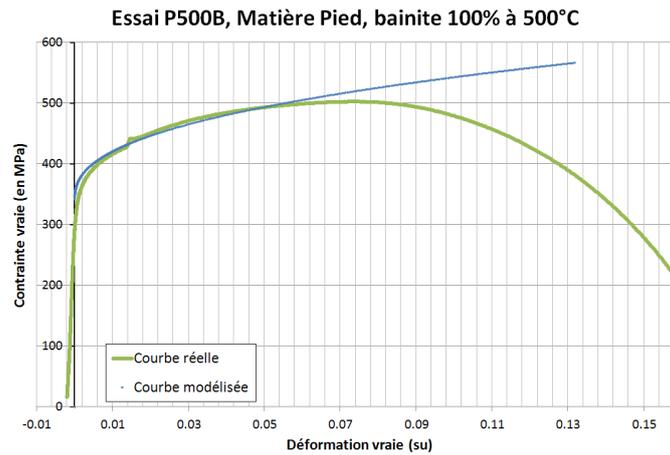


FIG. 5.– Courbe de traction expérimentale et modèle rhéologique déterminé.

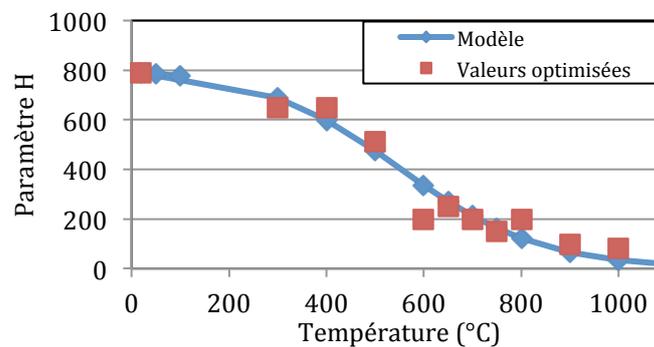


FIG. 6. – Exemple de variation du paramètre rhéologique H avec la température.

Le tableau ci-dessous contient les paramètres du modèle d'évolution des coefficients rhéologiques en fonction de la température pour la matière prélevée en pied de lingot et celle prélevée en tête de lingot.

	σ_0				H				N				K				m			
	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
Echantillon Pied de lingot, 100% bainite	380	0.015	-600	15	810	0.0069	-550	0	0.57	-0.007	500	0.2	6000	-0.008	-900	0	1.2	-0.009	-790	0
Echantillon Tête de lingot, 100% bainite	295	0.018	-655	12	755	0.01	-490	77	0.6	-0.01	-700	0.21	5340	-0.011	-815	0	1.15	-0.01	-750	0

3 Modélisation du procédé de trempe et résultats

Afin de simuler la déformation suite à la trempe des pièces de grandes dimensions qui peuvent présenter des appauvrissements ou enrichissements locaux d'éléments d'addition, nous avons modélisé un cas d'école : un demi-cylindre de 5200 mm de diamètre extérieur, 3500 m de haut et 170 mm d'épaisseur de paroi. La figure 7 présente la géométrie et la répartition du taux de carbone considérée, de manière à simuler la présence de zones constituées d'un matériau enrichi ou appauvri. L'écart au taux de carbone nominal introduit dans la simulation doit produire localement le déplacement du diagramme TTT que nous avons constaté expérimentalement entre la matière nominale (pied de lingot) et celle enrichie (tête de lingot). Ceci revient à utiliser des matériaux ayant des propriétés (diagrammes TTT) différentes. Durant la mise en forme des pièces par forgeage et usinage, une distribution non-axi-symétrique des zones ségréguées peut apparaître. Une telle distribution a été modélisée par une répartition cylindrique des zones enrichies dont l'axe est décalé de 30 mm par rapport à l'axe de la pièce, brisant ainsi l'axi-symétrie des propriétés métallurgiques de la pièce.

La trempe se fait par descente progressive dans le bain de trempe. La température initiale de la pièce est de 900°C et la température de l'eau de trempe est de 20°C. Les échanges thermiques avec l'air et l'eau, ainsi que le rayonnement thermique de la matière chaude sont prises en compte en fonction de la température. Après un refroidissement de 1 h en piscine de trempe la simulation conduit à la déformation résiduelle présentée en figure 7 b), amplifiée 50 fois. L'ovalisation maximale obtenue est de l'ordre de 7 mm, ce qui est du même ordre de grandeur que les constatations expérimentales pour des géométries équivalentes [7].

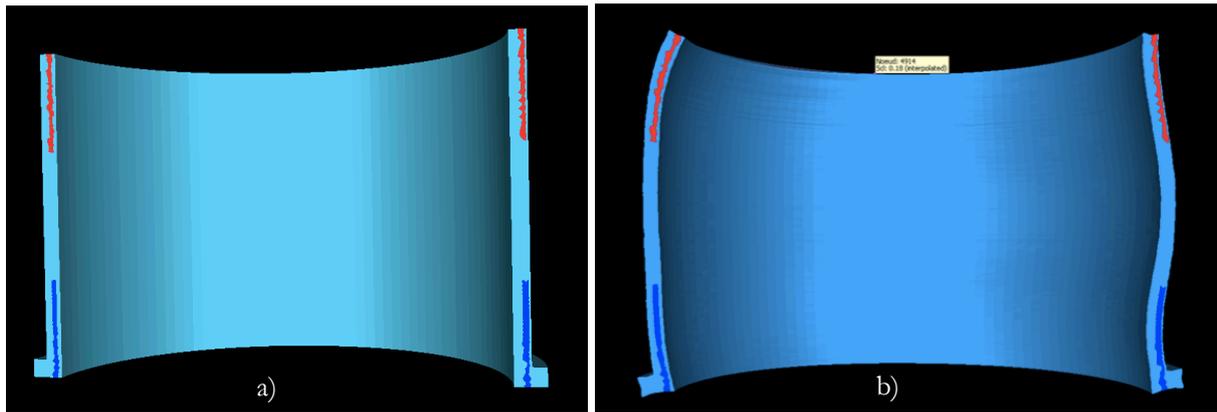


FIG. 7. – Exemple de pièce de grande dimensions modélisée avec des zones appauvries (bleu foncé) et enrichies (rouge) d'éléments d'addition (a) et déformée simulée de la pièce (x 50) après trempe (b)

4 Conclusions

L'étude menée dans le cadre d'une partie du projet ANR THERMIDE a permis la caractérisation du matériau 18MnNiMo-5 utilisé dans fabrication de viroles. Les zones macro-ségrégées présentes dans le matériau, inhérentes au mode de fabrication, ont des caractéristiques métallurgiques différentes du matériau de base influençant son comportement lors de la trempe. Des simulations utilisant le code de calcul Forge ont été menées avec prise en compte de l'hétérogénéité chimique du matériau. Les déformations calculées sont de l'ordre de grandeur de celles observées expérimentalement. Une investigation systématique des différentes géométries de pièces pourra permettre d'évaluer l'impact de la géométrie et de la distribution des zones ségrégées sur les déformations résiduelles.

Remerciements

Les auteurs remercient l'Agence Nationale de la Recherche pour le financement accordé pour la réalisation de ces travaux dans le cadre du projet ANR THERMIDE associé au programme de recherche "Matériaux et Procédés".

References

- [1] Montesin T., Llorca V., Logé R., Nectoux M., Optasanu V., Jobard D., Lasne P., Poitault I., THERMIDE : un programme de recherche pour optimiser les opérations de mise en forme et de traitements thermiques de composants métalliques, communication Congrès Français de Mécanique, Besançon, 2011
- [2] Thomas J-P., Cauquelin C., Construction des centrales REP-Équipements primaires, Techniques de l'ingénieur, Traité Génie nucléaire, BN 3 270.
- [3] Minne, J-B., Etude des déformations des viroles de générateurs des vapeurs, rapport interne projet ANR THERMIDE, 2010
- [4] Dupas P., Waeckel F., Recueil bibliographique de caractéristiques thermomécaniques pour l'acier de cuve, les revêtements inoxydables et les alliages 182 et 600, Note EDF HI-74/93/097, HT-26/93/058/A, 1994
- [5] Aliaga, C. Simulation numérique par éléments finis en 3D du comportement thermomécanique au cours du traitement thermique d'aciers: application à la trempe de pièces forgées ou coulées, thèse de doctorat, Ecole des Mines de Paris, 2000.
- [6] Cotton D., 2011, Effet des procédés de mise en forme et des traitements thermiques associés sur les propriétés d'emploi et la géométrie des pièces métalliques pour l'industrie, rapport interne projet ANR THERMIDE, 2012
- [7] Grégoire J-B., Etude des déformations des viroles, rapport interne projet ANR THERMIDE, 2008.