

# MODÉLISATION NUMÉRIQUE DU REVÊTEMENT D'ISOLATION THERMIQUE DE CANALISATIONS SOUS-MARINES

T. Hourdou <sup>a</sup>, S. Blassiau <sup>b</sup>, C. Ovalle <sup>a</sup>, A. Thionnet <sup>a,c</sup>, L. Laiarinandrasana <sup>a</sup>

<sup>a</sup> Centre des Matériaux, Mines Paristech, CNRS UMR 7633, BP 87, 91003 Evry cedex, France  
theophile.hourdou@mines-paristech.fr ;

<sup>b</sup> SAIPEM S.A., 7 Avenue de San Fernando, 78180 Montigny-le-Bretonneux, France ;

<sup>c</sup> Université de Bourgogne, Mirande, Dpt. IEM, BP 47870, 21078 Dijon, France.

**Mots-clés :** Polymères, Thermomécanique, Méthode Éléments-finis, Endommagement

## Résumé

*Le transport de pétrole en eaux profondes nécessite d'isoler thermiquement les conduites de transport de fluide. Ce revêtement est réalisé avant la mise en place de la ligne et est donc susceptible de s'endommager durant le processus de dépose de la canalisation. Le processus étudié ici entraîne en effet des sollicitations mécaniques correspondant à une flexion cyclique. Elle a été modélisée par Méthode Éléments Finis pour permettre d'identifier les zones les plus sollicitées. L'évolution des contraintes dans la structure modélisée montre que ces zones singulières subissent des chargements en traction tri-axiale et en compression bi-axiale, susceptible de générer le plus d'endommagement dans chacun des matériaux de revêtement.*

## 1 Introduction

Une des activités de la société SAIPEM consiste à l'installation de réseaux de conduites sous-marines. Ces conduites en acier nécessitent d'être isolées thermiquement afin de préserver les conditions optimales requises pour le transport du fluide de production. Dans le cadre de cette étude, l'isolation thermique est réalisée par un revêtement polymérique sur la paroi externe de la conduite qui est en contact direct avec le milieu marin. Ici le revêtement multi-matériaux étudié est constitué de plusieurs couches de polypropylène et de mousse syntactique de polypropylène.

SAIPEM souhaite développer une technique de dépose de canalisations sous-marines consistant à venir enrôler plusieurs kilomètres de conduite sur une bobine pour ensuite venir la dérouler avec une barge spécifique sur le fond marin (Fig. 1). Les conduites sont, dans ce cas, soumises à des sollicitations qui peuvent fragiliser notamment le revêtement isolant qui les recouvre. La difficulté majeure pour cette méthode d'installation est la prédiction du comportement de l'ensemble conduite acier - isolant thermique principalement au niveau des raccords suivant les conditions d'enroulement.

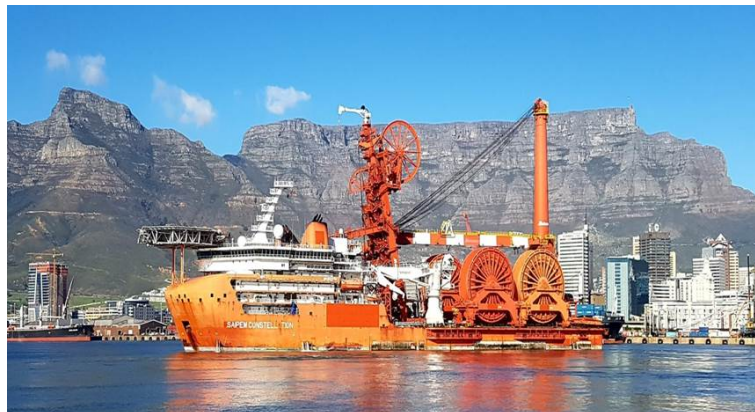


FIGURE 1 – Barge de dépose offshore par déroulement de pipeline

L'objectif de ce travail est d'étudier le point raccordement des conduites et plus particulièrement les matériaux isolants afin de modéliser au sens le plus large l'ensemble du processus de pose de la canalisation. L'analyse des champs mécaniques issus de la modélisation permet de mettre en évidence les zones susceptibles d'amorcer des phénomènes d'endommagement au cours de la mise en place de la conduite.

## 2 Méthode

Pour cette étude, le point de raccordement est constitué du tube en acier revêtu par plusieurs couches de polypropylène et de mousse syntactique de polypropylène. Ces polymères présentent des déformations visqueuses non-négligeables, ils ont été modélisés dans un premier temps par un comportement elasto-viscoplastique avec critère de von Mises, écoulement visco-plastique de Norton et écrouissage cinématique non-linéaire de Chaboche. L'acier, pour sa part, a été considéré comme élasto-plastique avec le même critère et le même écrouissage. Ces modèles ont été calibrés à partir de données issues de la littérature à différentes vitesses et différentes températures pour l'ensemble des matériaux [1, 2, 4].

Une étude numérique préliminaire par simulation d'un chargement représentatif de cette technique de dépose a été effectuée par Méthode Éléments Finis pour permettre d'identifier les zones les plus sollicitées dans le revêtement multi-matériaux. Ce procédé a été généralement simulé à son échelle globale, cependant différentes études ont démontré que les simulations de l'essai normatif de flexion induisaient les mêmes résultats [1].

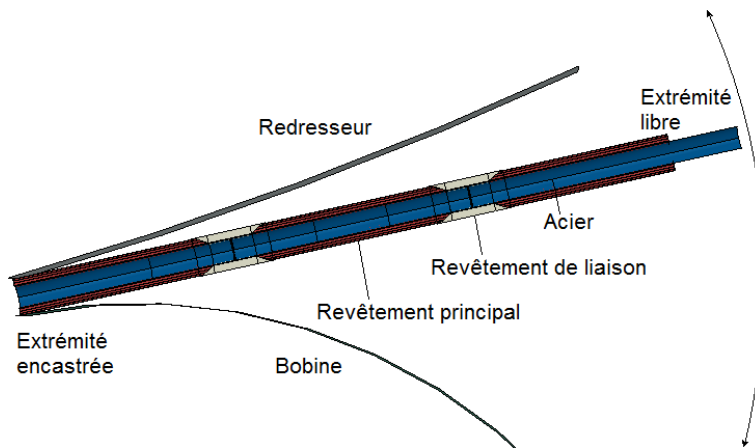


FIGURE 2 – Modélisation de l'essai de flexion d'une partie de conduite [3]

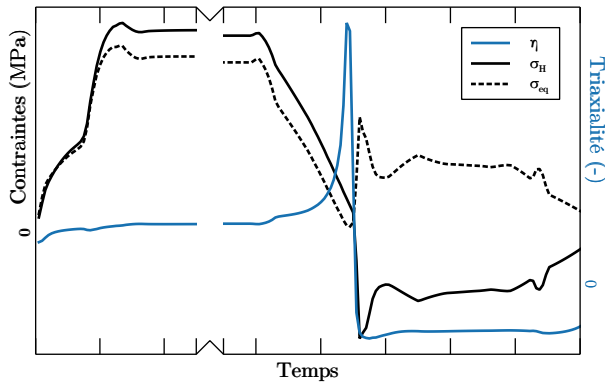
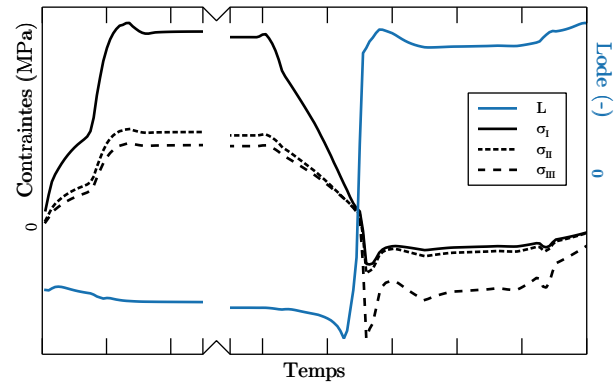
Une partie de conduite comprenant des zones de raccordements a été maillée en respectant les géométries des revêtements principaux et de liaisons. Une flexion progressive de la structure a été modélisée en imposant une composante verticale du déplacement d'un nœud de l'extrémité libre. Après accolement autour de la bobine, la conduite a été maintenue durant une durée significative et enfin redressée par flexion inverse [1, 2, 3].

## 3 Résultats et discussions

Les simulations effectuées montrent que les revêtements subissent un cycle à déformation imposée qui va générer des gradients de contraintes et déformations dans la structure. Cela entraîne des états de contraintes multi-axiales dans les zones singulières, principalement dus à la morphologie de la structure au niveau de la liaison. On a alors pu évaluer le taux de triaxialité des contraintes  $\eta$  (Eq. (1)) dont l'évolution est montrée sur la Figure 3.

$$\eta = \frac{\sigma_H}{\sigma_{eqVM}} \quad (1)$$

On remarque que ce taux est élevé tout au long de la première flexion pour le polypropylène. Cependant il augmente significativement lorsque la structure passe par une configuration relâchée, avant de s'inverser à une intensité plus faible due au rayon moins critique de la deuxième flexion.

FIGURE 3 – Évolution de  $\eta$  pendant le procédéFIGURE 4 – Évolution de  $L$  pendant le procédé

Cette augmentation est non représentative de la criticité de la sollicitation à cet instant, et est uniquement due à la baisse de la contrainte équivalente. On a alors calculé le paramètre de Lode  $L$  (Eq. (2)) [6] pour déterminer la différence d'amplitude des contraintes principales (Fig. 4). On voit alors que la flexion initiale correspond bien à la sollicitation la plus endommageante, ce qui est corrélé aux observations de fissurations du polypropylène dans différentes études dès cette première étape du procédé.

$$L = \frac{2 \sigma_{II} - \sigma_I - \sigma_{III}}{\sigma_I - \sigma_{III}} \quad (2)$$

Les composantes de contraintes et déformations élastiques, plastiques et visqueuses ont en outre pu être extraites aux points d'intégration les plus sollicités dans chaque matériau, pour les différentes dimensions de structure ainsi que les différentes vitesses et températures de sollicitation. Cela a permis de créer une cartographie des niveaux de déformations dépendant des différents paramètres métriques. Par ailleurs, il a été constaté que la viscosité entraînait une relaxation et une redistribution des contraintes durant le temps de maintien de la structure.

## 4 Conclusions et perspectives

Cette étude a alors pu démontrer que les zones singulières étaient les mêmes qu'expérimentalement observées dans la littérature. Des premières tendances de niveaux de déformations ont donc pu être évaluées. Une base de données expérimentale riche et fiable sera constituée pour modéliser plus finement les comportements mécaniques de ces matériaux. On observera à travers ces modèles les mécanismes d'endommagement généralement rencontrés dans les polymères et composites. Cet endommagement étant représenté par la porosité pour le polypropylène [5], son évolution sera modélisée à l'échelle macroscopique avec un critère de déformation volumique irréversible prenant en compte la pression hydrostatique [7].

L'utilisation du formalisme Éléments Finis multi-échelles FE<sup>2</sup> permet également de modéliser l'évolution des variables mécaniques homogénéisées dans les structures hétérogènes en considérant l'évolution de la microstructure à l'échelle mésoscopique [8]. Cependant cette méthode consomme énormément de ressources informatiques. Le développement d'un outil permettant la création d'une base de données numérique riche et fiable sera alors privilégié pour modéliser le comportement mécanique endommageable de la mousse syntactique de polypropylène.

## Références

- [1] Crome, T. (1999). Reeling of Pipelines with Thick Insulation Coating, Finite-Element Analysis of Local Buckling. 3. 10.4043/10715-MS.
- [2] Grytten, F. & Delhaye, V & Olafsen, K & Sjøhøderup, T. (2014). Numerical modeling of low temperature reeling of pipes. Proceedings of the International Offshore and Polar Engineering Conference. 261-270.
- [3] McCann, Finian & Ridolfi, Guido & Karjadi, Erwan & Demmink, Harm & Boyd, Helen. (2018). Numerical modelling of hot polymer-coated steel pipeline joints in bending. Ocean Engineering. 160. 10.1016/j.oceaneng.2018.04.057.
- [4] Laiarinandrasana, L & Besson, J. & Lafarge, M. & Hochstetter, G. (2009). Temperature dependent mechanical behaviour of PVDF : Experiments and numerical modelling. International Journal of Plasticity. 25. 1301-1324.
- [5] Laiarinandrasana, L & Selles, N. & Klinkova, O. & Morgeneyer, T & Proudhon, H. & Helfen, L. (2016). Structural versus microstructural evolution of semi-crystalline polymers during necking under tension : Influence of the skin-core effects, the relative humidity and the strain rate. Polymer Testing. 55.
- [6] Zhang, K.S & Bai, Jinbo & François, D. (2001). Numerical analysis of the influence of the Lode parameter on void growth. International Journal of Solids and Structures. 38.
- [7] Boisot, G. & Laiarinandrasana, L & Besson, J. & Fond, C. & Hochstetter, G. (2011). Experimental investigations and modeling of volume change induced by void growth in polyamide 11. International Journal of Solids and Structures – I48. 2642-2654.
- [8] Blassiau, S. & Bunsell, A.R & Thionnet, A. (2007). Damage accumulation processes and life prediction in unidirectional composites. Proceedings of the Royal Society. Volume 463, issue 2080.