

# Modélisation à l'échelle de la bande d'un réservoir à hydrogène fabriqué par enroulement filamentaire

G. Landron<sup>1</sup>, A. Rassineux<sup>1</sup>, C. Bovet<sup>2</sup>, C. Fagiano<sup>2</sup>, M. Hirsekorn<sup>2</sup>, E. Baranger<sup>3</sup>, D. Espinassou<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire Roberval, Université de Technologie de Compiègne, France, {gaspard.landron, alain.rassineux}@utc.fr

<sup>2</sup> Département Matériaux et Structures (DMAS), ONERA, France, {christophe.bovet, christian.fagiano, martin.hirsekorn}@onera.fr

<sup>3</sup> Université Paris-Saclay, CentraleSupélec, ENS Paris-Saclay, CNRS, LMPS - Laboratoire de Mécanique Paris-Saclay, France, emmanuel.baranger@ens-paris-saclay.fr

<sup>4</sup> CETIM Nantes, France, denis.espinassou@cetim.fr

**Résumé** — Nous présentons une modélisation à l'échelle de la bande d'un réservoir à hydrogène fabriqué par enroulement filamentaire pour la détection de l'amorçage d'endommagement. Un outil de maillage par élévation d'une grille de quadrangles maille de manière conforme les zones de superpositions et les chevauchements entre bandes pour prendre en compte la géométrie des motifs de drapage. La méthode *FETI* a été utilisée pour simuler le comportement en élasticité linéaire. Des mesures géométriques et mécaniques sur le réservoir réel sont comparées à celles du réservoir numérique afin de valider le modèle.

**Mots clés** — enroulement filamentaire, maillage, échelle mésoscopique, décomposition de domaine.

## 1 Introduction

La problématique du stockage de l'hydrogène fait l'objet de nombreux projets de recherche, notamment pour le dimensionnement des réservoirs à hydrogène de type IV. Ces réservoirs sont composés d'un liner en plastique, d'un bouchon métallique, ou deux, permettant les opérations de remplissage et d'un renfort composite assurant la reprise des efforts lors de la pressurisation. La géométrie de ces réservoirs consiste généralement en deux dômes elliptiques reliés par une partie cylindrique appelée virole. Le dimensionnement vise à garantir un éclatement dans la virole, pour une pression supérieure ou égale à 225% de la pression nominale d'utilisation.

Le renfort est généralement constitué de bandes de fibres de carbone, plongées dans une matrice thermdurcissable qui sont enroulées sur la surface de pose puis mises en cuisson en autoclave. Un procédé est développé au CETIM depuis 2013 [8], permettant la dépose progressive avec contact de bandes de fibres de carbone à matrice thermoplastique avec une chauffe par assistance laser. La matrice thermoplastique entourant les fibres est fondue sur la surface de pose ou sur les bandes déposées précédemment. Chaque recouvrement total du réservoir est appelée une couche, dont l'orientation est définie par l'orientation des bandes dans la virole par rapport à l'axe du réservoir. Chaque couche est obtenue à partir de la répétition d'un motif de drapage en forme d'étoile défini par son nombre de branches.

Afin de prédire la tenue et la zone d'éclatement de ces réservoirs, les modèles actuels s'appuient sur une représentation axisymétrique obtenue à partir d'une approximation de l'épaisseur moyenne de chaque couche de renfort et de l'orientation de leurs fibres le long du dôme [9, 16, 17]. Le comportement en rupture est évalué à l'aide d'un modèle d'endommagement : critère de rupture atteint [11] ou endommagement progressif par pénalisation des propriétés mécaniques des éléments [1, 9, 12]. Ces modélisations ont un coût de calcul faible, mais elles négligent l'architecture en motifs de chaque couche du renfort. Un intérêt grandit pour des modélisations qui prendraient en compte les entrelacements des bandes [8, 13] ainsi que les défauts de la structure, tels que les porosités et les poches de matrice [12]. Cependant, aucune modélisation ne permet aujourd'hui de modéliser l'architecture complexe du dôme afin de déterminer l'effet des désorientations hors plan induits par les motifs de drapage sur l'amorçage d'endommagement.

Cet article présente la mise en place et les validations géométrique et mécanique d'une méthodologie de modélisation à l'échelle de la bande de l'ensemble de la structure. Nous présentons d'abord les données d'entrée utilisées par le CETIM pour fabriquer un réservoir. Puis nous décrivons l'algorithme

permettant de mailler la géométrie des bandes par élévation des éléments d'un maillage surfacique. Nous utilisons la méthode de résolution parallèle *FETI* [7] présente dans la suite éléments finis Z-set<sup>1</sup>, pour modéliser le comportement élastique linéaire sous pression interne. Nous comparons ensuite l'épaisseur du renfort obtenu à celle mesurée sur une tomographie macroscopique du renfort effectuée au CETIM [8]. Enfin, nous comparons les déformations circonférentielles et axiales à celles mesurées par le CETIM au cours d'un essai de pressurisation [8].

## 2 Données d'entrée : surface et trajectoires de pose

Le réservoir considéré est un réservoir de 23 litres utilisé pour le stockage d'hydrogène gazeux sous une pression de 70 MPa [8]. Il est composé d'un liner en plastique, de deux bouchons en aluminium fermés par deux vis en acier et d'un renfort composite de 55 couches fabriqué par enroulement filamentaire de bandes de fibre de carbone à matrice thermoplastique. Le CETIM utilise le logiciel CompositiCAD<sup>2</sup> afin de générer les trajectoires de pose du robot, que l'on suppose être les trajectoires de la fibre neutre des bandes déposées. Une description de la surface de pose et une séquence d'empilement sont données en entrée à CompositiCAD qui détermine un motif et une trajectoire permettant de recouvrir l'ensemble du liner pour chaque couche. La Figure 1 montre la surface de pose définie comme une surface de révolution obtenue à partir d'une méridienne discrétisée fournie par le CETIM, et une partie de la trajectoire de drapage permettant de couvrir le réservoir avec un motif à six branches. Les trajectoires sont toujours définies sur la surface de pose et ne tiennent pas compte de l'évolution de l'épaisseur au cours du drapage

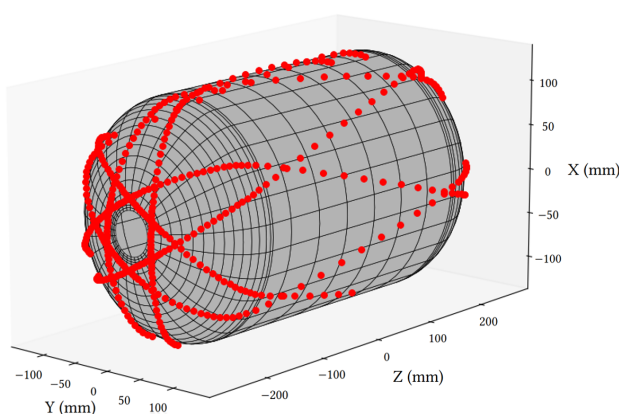


FIGURE 1 – Trajectoire de drapage d'un motif à 6 branches

## 3 Construction du maillage

### 3.1 Philosophie de l'algorithme de maillage

La principale problématique associée au maillage d'un dôme de réservoir fabriqué par enroulement filamentaire est le nombre important de zones de superpositions de bandes, à géométries variables. Cela rend la conformité du maillage entre les bandes difficile à obtenir [10]. L'influence des chevauchements sur le comportement du renfort a été étudiée au niveau de la virole [15] où les géométries des zones de superposition sont moins complexes.

Afin de garantir une conformité du maillage entre chaque bande, l'algorithme présenté dans ce paragraphe génère tous les éléments par élévation des éléments d'une grille de quadrangles selon la normale à la surface de pose, donnant un aspect voxelisé au résultat final.

1. <http://www.zset-software.com/>

2. <https://www.compositicad.com/>

## 3.2 Surface de pose

L'outil de maillage utilise un modèle géométrique généré à partir d'un maillage surfacique de la surface de pose, supposée axisymétrique. Cette hypothèse est conservée entre chaque couche de renfort. Le maillage surfacique est défini comme une grille obtenue par révolution d'une discrétisation raffinée de la méridienne fournie par le CETIM. La forme du dôme est approximée par une superellipse. La discrétisation de la méridienne du modèle est définie telle que le rapport d'élongation des quadrangles du maillage surfacique reste constant le long de la structure. La taille de maille  $h$  sur le dôme à rayon  $r$  peut s'exprimer :

$$h(r) = h_{Max} \frac{r}{R} \quad (1)$$

avec  $h_{Max}$  la taille de maille au niveau de la virole à rayon  $R$ . Le nombre de découpages angulaires  $n_\theta$  de la surface de révolution est défini par la relation  $n_\theta = \frac{2\pi R}{h_{Max}}$ . La discrétisation de la méridienne reste constante au cours de la génération du maillage du renfort.

## 3.3 Discrétisation des trajectoires

Les éléments du maillage sont construits à partir des quadrangles de la grille dans lesquels sont projetés un ou plusieurs points de la trajectoire. Afin de garantir la continuité du maillage généré, on discrétise les trajectoires de bandes avec un pas cinq fois inférieur à la taille de maille minimale selon la direction de la fibre neutre et selon la direction transverse. La direction transverse est définie comme le produit vectoriel de la direction de la fibre neutre et de la normale à la surface locale. Ce choix implique que plusieurs points peuvent être déposés dans le même quadrangle du maillage surfacique. Afin de différencier les points issus de différents passages du robot sur la même zone et les points générés par le raffinement de la discrétisation, on définit l'abscisse curviligne  $w$  le long de la trajectoire :  $w = \frac{d}{5h_{Min}}$ , avec  $d$  la distance parcourue depuis le premier point déposé. Lorsque la différence entre les abscisses curvilignes de deux points est grande, cela signifie qu'il s'agit de différents passages de la tête de pose.

## 3.4 Génération du modèle géométrique

Le modèle géométrique est construit pour chaque couche du renfort à partir des trajectoires de pose rediscrétisées. On projette chaque point de la trajectoire selon la normale à une approximation convexe de la surface de pose de la dernière couche déposée pour déterminer quelle face utiliser pour potentiellement générer un élément. Pour le premier point de la trajectoire d'une couche, l'élément solution est recherché sur l'ensemble de la grille. Ensuite, cette recherche n'est faite que dans les quadrangles voisins à ceux identifiés pour les points précédents. Une fois la projection effectuée, on vérifie si l'on doit générer un élément. Dans le modèle géométrique, un élément n'est défini que par une case d'appartenance, un niveau de hauteur et une abscisse curviligne. On distingue trois cas, illustrés sur la Figure 2 :

- aucun élément n'a été créé sur cette case, on crée un élément sur la surface, indépendamment du fait que les éléments adjacents aient une abscisse curviligne proche, comme sur la Figure 2a, ou lointaine, comme sur la Figure 2b ;
- un élément avec une abscisse curviligne proche a déjà été créé, on lui associe l'abscisse curviligne du nouveau point, Figure 2c ;
- un élément avec une abscisse curviligne lointaine a déjà été créé, on crée un élément un niveau au-dessus, Figure 2d.

Le modèle géométrique donne une carte des niveaux d'épaisseur pour une couche la structure. A ce stade, ni la connectivité ni les noeuds n'ont été créés.

## 3.5 Génération du maillage

### Génération des noeuds et des éléments volumiques

La génération du modèle géométrique a permis d'obtenir les niveaux d'épaisseur tout en conservant l'ordre de création des éléments. En retraçant cet ordre, on crée huit noeuds par élément d'abscisse curviligne  $w$ . Les noeuds sont créés par paire contenant un noeud de la face inférieure de l'élément et un noeud de la face supérieure, relativement à la normale de pose. A chaque sommet du maillage surfacique,

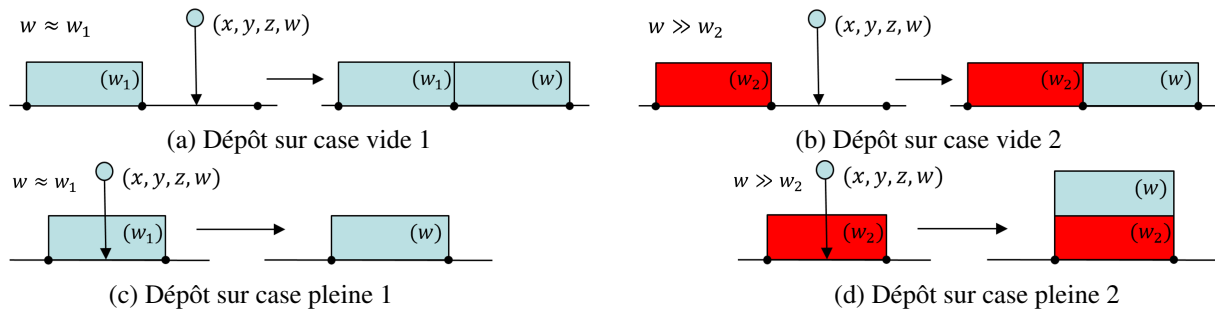


FIGURE 2 – Niveau d'épaisseur du modèle géométrique

on garde en mémoire le noeud de la face inférieure du dernier élément créé en tant que surface inférieure, et le noeud de la face supérieure en tant que surface supérieure. Ces notions de surfaces inférieure et supérieure permettent de gérer les chevauchements entre bandes :

- si aucun noeud n'a été créé, on crée un noeud au niveau 0 (surface inférieure) et un autre au niveau 1 (surface supérieure);
- si un noeud a déjà été créé avec une abscisse curviligne proche, on crée un noeud au niveau de la surface inférieure et un autre au niveau de la surface supérieure;
- si un noeud a déjà été créé avec une abscisse curviligne lointaine, le noeud de la surface supérieure devient celui de la surface inférieure du nouvel élément et un nouveau noeud est créé un niveau au-dessus selon la normale à la surface, formant la nouvelle surface supérieure, comme illustré sur les Figures 3a et 3b.



FIGURE 3 – Génération des noeuds et gestion des chevauchements à partir du modèle géométrique

Cette méthode génère nécessairement des noeuds doublons. Un algorithme adapté permet de les fusionner.

### Lissages

Différentes étapes de lissage sont mises en places pour améliorer la géométrie du maillage et pour respecter l'hypothèse d'axisymétrie de la surface de pose entre chaque couche. Le maillage est d'abord lissé par l'algorithme de Catmull-Clark [5], appliqué à la composante selon la normale à la surface de pose, avec une procédure de type "inflate and shrink" [14]. Un second lissage est nécessaire afin de respecter l'hypothèse d'une surface de pose de révolution entre chaque couche. Pour chaque point de la méridienne de la surface de pose mise à jour, les rapports de distance entre les noeuds situés entre la méridienne et la surface extérieure sont conservés, seules les épaisseurs sont modifiées. L'effet du lissage est illustré sur la Figure 4.

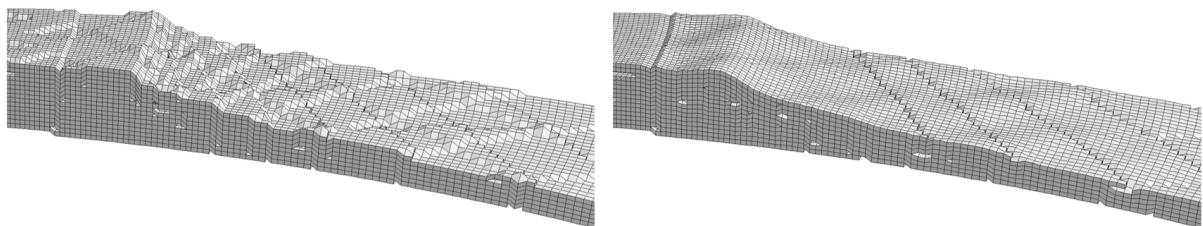


FIGURE 4 – Comparaison d'une tranche du maillage du sommet de la première couche avant et après lissage

## Cas particulier du sommet du dôme

Le sommet du dôme est une zone sur laquelle le robot ne parvient pas à presser la bande sur la surface de pose [8]. Une génération à partir de la surface de pose ne peut donc pas représenter cette zone spécifique. La génération des éléments y est donc adaptée : les éléments ne sont plus générés sur la face supérieure des éléments précédents mais au même niveau que l'élément déjà généré le plus haut dans la tranche considérée du découpage angulaire. Cela fait apparaître des trous entre les bandes, ce qui correspond aux observations faites sur le réservoir réel.

Le maillage complet du réservoir est généré en 30 minutes et il est constitué d'approximativement 95 millions d'éléments, dont 93 millions d'éléments pour le renfort.

## 4 Simulation d'un chargement de pressurisation

### 4.1 Mise en données

La simulation mise en place consiste en une pressurisation du réservoir avec une pression de 70 MPa appliquée sur la surface intérieure du liner. Les mouvements de corps rigide sont supprimés en bloquant les déplacements de trois noeuds du maillage. Le problème est constitué de 95 millions d'éléments et 105 millions de noeuds. Les bouchons, les vis et le liner sont modélisés avec un comportement élastique isotrope, tandis que le renfort composite est modélisé avec un comportement élastique isotrope transverse. Les propriétés matériaux utilisées sont identiques aux propriétés élastiques utilisées par le CETIM [8].

L'orientation attribuée est celle de la trajectoire de la fibre neutre sans tenir compte de la géométrie des chevauchements. La géométrie des chevauchements dans le maillage est une approximation de la géométrie réelle. Tenir compte de la désorientation d'un élément lors de l'attribution de l'orientation matériau reviendrait à introduire deux erreurs : une erreur géométrique et une erreur d'orientation fondée sur la géométrie.

Le problème est résolu en élasticité linéaire en accord avec les observations expérimentales du CETIM : au cours de la pressurisation d'un réservoir, le comportement de la structure est élastique linéaire, jusqu'à l'éclatement qui est piloté par la rupture de fibres avec un endommagement matriciel localisé autour de la zone de rupture [8].

### 4.2 Résolution massivement parallèle par la méthode *FETI*

Le problème global comporte 315 millions de degrés de liberté, ce qui rend indispensable les méthodes de calcul haute performance. La suite de calcul Z-set dispose d'une implémentation de la méthode *FETI* [2, 3, 7]. La décomposition de domaine est une méthode de résolution utilisant une partition du problème global. Le maillage présenté dans ce travail a été décomposé de manière automatique en 1540 sous-domaines, comme illustré sur la Figure 5. Chaque sous-domaine comporte environ 62000 éléments. La méthode *FETI* requiert le calcul des noyaux locaux des opérateurs éléments finis. Ces noyaux sont les mouvements de corps rigides des sous-domaines flottants. Ces noyaux sont calculés avec le solveur Rugged [4]. Le problème aux interfaces est préconditionné avec un préconditionneur lumpé pour limiter les coûts en mémoire. Le calcul a été fait sur le supercalculateur Sator de l'ONERA, qui permet de résoudre chacun des 1540 problèmes locaux sur 3 coeurs. La résolution est donc faite sur 4620 coeurs en simultané. La méthode mise en place permet le calcul d'un incrément en élasticité linéaire en 12 minutes.

## 5 Validation du modèle

### 5.1 Validation géométrique

Cette section vise à comparer les profils d'épaisseur du renfort obtenu avec l'outil de maillage et celui du réservoir réel. Les bandes utilisées pour générer le maillage ont une largeur de 14mm et une épaisseur de 0.22mm, toutes deux constantes en tout point. Le maillage a été généré avec une taille de maille minimale de 0.17mm et une taille de maille maximale de 0.92mm, avec 919 découpages angulaires.

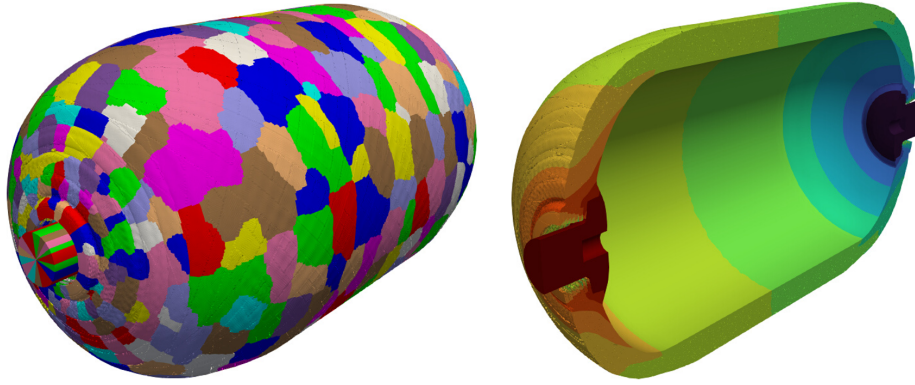


FIGURE 5 – Décomposition du maillage et déplacement axial sous 70MPa de pression interne

D'une part, on peut comparer la masse du renfort. Le réservoir réel a une masse de 16.95kg. Le CETIM a fourni une masse volumique de la bande estimée à  $1.5 \text{ g/cm}^3$  [8]. Le volume du maillage de renfort généré aurait ainsi une masse de 19.02kg, soit 12.2% d'erreur relative. Cela met en évidence que la stratégie créant des éléments à partir de tous les quadrangles dans lesquelles un point de la trajectoire a été projeté surestime la largeur de bande et donc la masse du renfort.

D'autre part, le profil d'épaisseur du maillage a été comparé avec l'épaisseur du renfort du réservoir identifiée à partir d'une tomographie avec une résolution de  $200\mu\text{m}$  [8]. La Figure 6 présente les mesures d'épaisseur le long de la surface de pose. Les mesures correspondent à la moyenne de la distance selon la normale à la surface de pose entre la surface interne et la surface externe du renfort sur différentes portions du réservoir, sur l'ensemble de la circonférence de la portion considérée. Les écarts types sont très petits pour le renfort réel, ce qui suggère la validité de l'hypothèse d'un profil d'épaisseur axisymétrique entre chaque couche du modèle, utilisée pour la génération du modèle 3D.

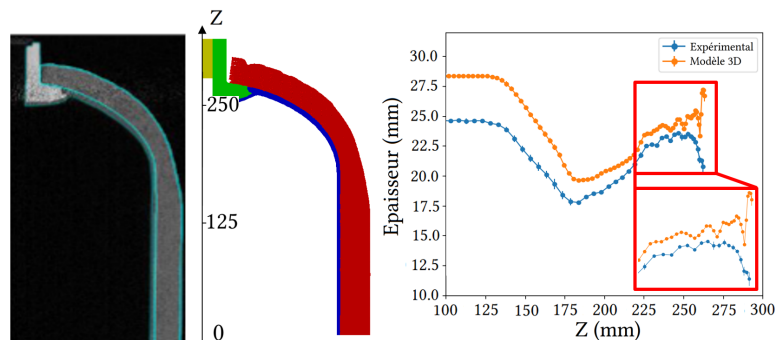


FIGURE 6 – Comparaison du profil d'épaisseur réel au profil d'épaisseur généré [8]

On distingue principalement deux zones avec une erreur importante : la zone de la virole avec une erreur relative de 15.0%, et le sommet du dôme avec une erreur relative maximale de 27.0%. L'erreur commise sur la zone cylindrique pourrait être due à plusieurs causes : la largeur de bande surestimée ou bien la présence de nombreux vides dans la structure dus au choix de modélisation de la géométrie des chevauchements. Des vides similaires peuvent être observés dans le renfort réel. Cependant, cette zone est composée d'un empilement simple, avec seulement deux orientations de plis par couche et des ondulations hors-plan au niveau des chevauchements d'une hauteur de l'ordre de l'épaisseur de bande. Ainsi, il est très probable que le comportement de cette portion de la structure soit correctement modélisé malgré la différence d'épaisseur.

L'erreur au niveau du sommet du dôme peut être expliquée différemment. L'erreur commise sur la largeur de bande est moins importante, due à la taille des quadrangles à partir desquels les éléments sont générés dans cette zone. Une partie de l'erreur pourrait être due à l'écart entre le point de pose du robot et la trajectoire fournie, notamment lorsque l'épaisseur cumulée devient importante. Cette différence n'est actuellement pas prise en compte lors de la génération du modèle géométrique. Cependant, la dépose par contact entre la tête et la surface de pose permet de limiter les glissements de la bande. On peut supposer qu'il y a donc peu d'écart entre les positions de dépose réelle et modélisée, et que la différence observée

n'est due qu'à une différence d'altitude des plis obtenue à cause de la méthode de maillage du sommet du dôme qui ne génère pas une géométrie suffisamment compactée.

## 5.2 Validation mécanique

Afin de valider la modélisation, le comportement de la structure est comparé à des mesures expérimentales effectuées par le CETIM [8]. Au cours d'un essai de pressurisation, la déformation circonférentielle du réservoir a été mesurée à l'aide de jauges de déformation dans quatre zones du renfort : le sommet du dôme (jauges 1-2-3-13), le milieu du dôme (jauges 4-5-6), la zone de transition dôme/virole (jauges 7-8-9) et le milieu de la virole (10-11-12). La déformation axiale a également été mesurée au milieu de la virole (jauge 14-15-16). Dans chaque zone, trois jauges ont été placées à 120 degrés les unes des autres afin de prendre en compte la variabilité des mesures. L'angle de référence des jauges n'ayant pas été repéré, le comportement du modèle numérique est mesuré tous les 5 degrés sur une surface égale à l'aire des jauges expérimentales de 8mm × 8mm. Les déformations circonférentielles et axiales du modèle numérique sont calculées comme la moyenne volumique de la déformation des éléments appartenant à la jauge numérique (2) :

$$\varepsilon_{ii}^j = \frac{1}{V} \int_V \varepsilon_{ii} dV \quad , i \in \{\theta, z\} \quad (2)$$

avec  $\varepsilon_{ii}^j$  la déformation moyenne de la jauge numérique,  $\varepsilon_{ii}$  et  $V$  la déformation et le volume des éléments couverts par la jauge. Les résultats sont présentés sur la Figure 7.

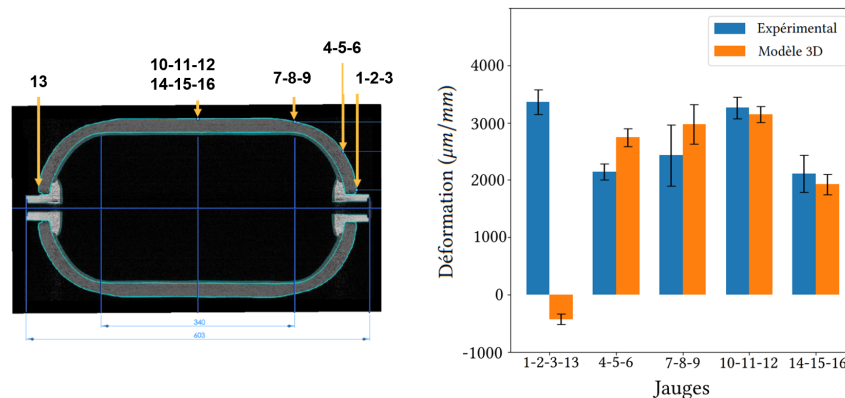


FIGURE 7 – Comparaison des déformations expérimentales [8] et numériques

Au milieu de la virole (jauges 10-11-12, 14-15-16), le modèle parvient à reproduire correctement le comportement du réservoir malgré l'erreur commise sur le profil d'épaisseur, ce qui semble confirmer la bonne représentation des orientations de bandes dans le renfort. La déformation est sous-estimée, ce qui est cohérent avec l'épaisseur surestimée du renfort. L'écart-type important des mesures expérimentales de déformations dans la zone de transition dôme/virole (jauges 7-8-9) suggère qu'une comparaison quantitative de la déformation moyenne du modèle numérique aux mesures expérimentales manquerait de pertinence au vue du manque d'information quant à la position réelle des jauges sur le réservoir. Les différences observées peuvent également être dues aux propriétés utilisées, qui sont issues d'une analyse de sensibilité qui a montré une forte dépendance à la raideur transverse des bandes [8]. Ces propriétés qui ont été identifiées dans le cadre d'un modèle axisymétrique à l'échelle de la couche pourraient ne pas être adaptées pour une modélisation de la géométrie plus fine.

Au sommet du dôme, le paragraphe précédent a permis de constater une différence importante entre le réservoir généré et le réservoir réel. Le maillage des bandes a été généré à la bonne position, mais l'erreur sur l'épaisseur induit une désorientation hors plan qui n'est pas prise en compte par la trajectoire. L'erreur géométrique ne permet donc pas d'utiliser l'hypothèse que l'orientation des bandes correspond à celle de la trajectoire de pose. Cette erreur modifie le comportement au sommet du dôme et pourrait également avoir une incidence sur le comportement au milieu du dôme. Afin d'obtenir le bon comportement, il est nécessaire de parvenir à corriger le profil d'épaisseur au sommet du dôme, ce qui devrait corriger l'erreur commise sur l'orientation matériau dans la mise en données.

## 6 Conclusions et perspectives

Une méthodologie permettant de modéliser le comportement du réservoir à l'échelle de la bande a été mise en place malgré la complexité de l'architecture et la taille du problème généré. Une meilleure compréhension du procédé de fabrication est cependant nécessaire pour modéliser correctement le sommet du dôme. Il est nécessaire de prendre en compte la désorientation de la bande due à l'épaisseur cumulée au cours du drapage pour modéliser correctement le comportement de la structure, la trajectoire nominale ne suffit pas. La comparaison des déformations locales avec des mesures expérimentales permet d'établir la cohérence du comportement simulé, mais les sources d'erreur sont nombreuses, et nécessitent d'être analysées plus précisément.

De futurs travaux prendront en compte la géométrie du maillage lors de la définition du repère matériau, tout en corrigeant la géométrie du dôme. Afin d'étudier l'amorçage de l'endommagement dans la structure, l'étude de grandeurs locales est nécessaire. Cependant, les maillages voxelisés génèrent des surcontraintes locales artificielles [6], qui sont d'autant plus grandes que le maillage est fin. Un lissage du champ de contrainte est donc nécessaire pour analyser l'endommagement du réservoir.

### Références

- [1] J. P. Berro Ramirez, D. Halm, J.-C. Grandidier, S. Villalonga, F. Nony *700 bar type IV high pressure hydrogen storage vessel burst - Simulation and experimental validation*, International Journal of Hydrogen Energy, Pages 13183-13192, 2015.
- [2] C. Bovet, A. Parret-Fréaud, N. Spillaned, P. Gosselet, *Adaptive multipreconditioned FETI : Scalability results and robustness assessment*, Computers and Structures, Page 20, 2017.
- [3] C. Bovet, A. Parret-Fréaud, P. Gosselet *Two-level adaptation for Adaptive Multipreconditioned FETI*, Advances in Engineering Software, 2021
- [4] C. Bovet, *On the use of graph centralities to compute generalized inverse of singular finite element operators : Applications to the analysis of floating substructures*, International Journal for Numerical Methods in Engineering, Pages 1929-2129, 2022
- [5] E. Catmull, J. Clark, *Recursively generated B-spline surfaces on arbitrary topological meshes*, Computer-aided design, 1978.
- [6] A. Doitrand, C. Fagianio, F.-X. Irisarri, M. Hirsekorn, *Comparison between voxel and consistent meso-scale models of woven composites*, Composites : Part A, Pages 143-154, 2015.
- [7] C. Farhat, F.-X. Roux, *A method of finite element tearing and interconnecting and its parallel solution algorithm*, International Journal for Numerical Methods in Engineering, Pages 1205-1227, 1991.
- [8] D. Guillon, D. Espinassou, P. Pichon, J. J. R. Carillo, C. Landry, D. Clainchard, L. Juras, R. Brault, *Manufacturing, burst test and modeling of high pressure thermoplastic composite overwrap pressure vessel*, Composite Structures, 2023
- [9] D. Leh, P. Saffré, P. Francescato, R. Arrieux, S. Villalonga, *A progressive failure analysis of a 700-bar type IV hydrogen composite pressure vessel*, International Journal of Hydrogen Energy, Pages 13206-13214, 2015.
- [10] X. Li, J. Dufty, G. Pearce, *Automation of tow wise modelling for automated fibre placement and filament wound composites*, Composites Part A, 2021.
- [11] M. Nebe, T.J. Asijee, C. Braun, J.M.J.F. van Campen, F. Walther, *Experimental and analytical analysis on the stacking sequence of composite pressure vessels*, Composite Structures, 2020.
- [12] R. Rafiee, M. A. Torabi, *Stochastic prediction of burst pressure in composite pressure vessels*, Composite Structures, 573-583, 2018.
- [13] R. Rafiee, A. Salehi, *Estimating the burst pressure of a filament wound composite pressure vessel using two-scale and multi-scale analyses*, Mechanics of Advanced Materials and Structures, 2022.
- [14] A. Rassineux, *Robust conformal adaptive meshing of complex textile composites unit cells*, Composite Structures, 2022.
- [15] J. Tang, G. Zhao, J. Wang, Y. Ding, Y. Feng, Y. Chen, C. Zhang, Q. Huang, S. Xin, J. Xu, *Computational Geometry-Based 3D Yarn Path Modeling of Wound SiCf/SiC-Cladding Tubes and Its Application to Meso-Scale Finite Element Model*, Frontiers in Materials, 2021.
- [16] R. Wang, W. Jiao, W. Liu, F. Yang, *Dome Thickness Prediction of Composite Pressure Vessels by a Cubic Spline Function and Finite Element Analysis*, Polymers and Polymer Composites, 2011.
- [17] H. Wang, S. Fu, Y. Chen, L. Hua *Thickness-Prediction Method Involving Tow Redistribution for the Dome of Composite Hydrogen Storage Vessels*, polymers, 2022.