

Etude de sensibilité paramétrique aux changements des propriétés mécanique de l'intermétallique sur le comportement d'un réservoir hybride de stockage d'hydrogène : cas de fuite

A. Hocine ⁽¹⁾, D. Chapelle ⁽²⁾, M. L. Boubakar ⁽²⁾, A. Bezazi ⁽³⁾, A. Benamar ⁽⁴⁾

⁽¹⁾ Université Hassiba Benbouali, BP. 151, Chlef 02000, Algérie

E-mail: hocinea_dz@yahoo.fr

⁽²⁾ Institut FEMTO-ST, Dept. LMARC, 24, rue de l'épitahe, 25000 Besançon, France

E-mail: david.chapelle@univ-fcomte.fr and lamine.boubakar@univ-fcomte.fr

⁽³⁾ Université 08 Mai 1945, BP. 401, Guelma 24000, Algérie.

E-mail: ar_bezazi@yahoo.com

⁽⁴⁾ ENSET, Département de mécanique, BP 1523, Oran 31000, Algérie,

E-mail benamar_dz@yahoo.fr

Résumé

Ce travail est focalisé sur le développement d'une solution hybride de stockage d'hydrogène. Cette solution est constituée d'un enroulement carbone/époxy enrobe sur un liner en aluminium. Un ruban d'intermétallique est déposé entre le liner et le composite. L'enveloppe liner assure l'étanchéité, en cas de défaillance de cette dernière, l'intermétallique par absorption d'hydrogène doit fermer les fissures pour empêcher la fuite. Le composite assure la rigidité de la solution de stockage. Les propriétés de l'intermétallique sont des variables clés dans l'analyse de gonflement sur la solution hybride. Ces propriétés sont déterminées par la loi des mélanges et par une campagne des essais expérimentaux. Le but de ce travail est d'effectuer une première approche paramétrique afin de comprendre la sensibilité des simulations faites au cours de ce travail lors d'un changement des propriétés élastiques de la barrière intermétallique.

Mots clés : Intermétallique, Composite, Liner, Hybride, Hydrogène, Gonflement, Fuite.

1. Introduction

Le stockage est l'une des étapes clés de l'utilisation de l'hydrogène comme vecteur d'énergie. En effet, quelle que soit l'application visée, il est nécessaire d'avoir un système permettant de stocker l'hydrogène afin de conférer une certaine autonomie à ce système.

En matière de stockage embarqué, les objectifs de développement les plus communément admis sont calculés sur la base d'un stockage d'hydrogène embarqué d'une capacité de 5 kg (quantité d'hydrogène permettant théoriquement à un véhicule particulier d'avoir une autonomie d'environ 500 km) [1].

Actuellement, il existe trois grandes familles de systèmes de stockage d'hydrogène, chacune ayant des avantages et des inconvénients spécifiques lui permettant d'être intégrée, ou non, dans une application particulière [2,3]:

- ❖ le stockage d'hydrogène comprimé à haute pression (200, 350 et 700 bars) ;
- ❖ le stockage cryogénique d'hydrogène liquide (-253°C) ;

❖ le stockage solide d'hydrogène.

Dans ce travail, on propose une solution hybride, de stockage d'hydrogène, qui consiste à associer dans un même réservoir une enveloppe de cœur sous pression, contenant l'hydrogène utile et une enveloppe externe emprisonnant un intermétallique ayant pour fonctions d'une part la capture de l'hydrogène suite à la défaillance de l'enveloppe de cœur et donc de fuites, et d'autre part de permettre éventuellement la fermeture de la fissure. La rigidité de la solution proposée est assurée par un enroulement filamentaire en carbone/époxy.

Hocine et al. [4] propose une approche analytique du comportement statique de la solution de stockage sous pression interne avec effet de fond. L'analyse effectuée se base sur des propriétés mécaniques de l'intermétallique obtenues par la loi des mélanges.

Les propriétés élastiques des rubans d'intermétallique sont des variables clés pour l'analyse de l'effet de son gonflement sur le liner et sur le composite en cas de fuite. Le but de ce travail est d'effectuer une caractérisation dimensionnelle et

mécanique en premier lieu ensuite établir une première approche paramétrique afin de comprendre la sensibilité des simulations faites sur la base de loi des mélanges [5], lors d'un changement des propriétés élastiques de la barrière intermétallique.

2. Essais de caractérisation mécanique

Ce premier de volet de l'analyse expérimentale se focalise sur la caractérisation d'une couche absorbante d'hydrogène en Zr_3Fe .

Le Tableau 1 présente les propriétés des constituants de l'intermétallique en Zr et en Fe [6]. Comme première approche, les propriétés du composé intermétallique sont obtenues par le biais de la loi des mélanges et l'utilisation des compositions atomiques.

Matériau	E [GPa]	ν	α °C. 10^{-6}	Densité g/cm^3
Zr	98	0.38	5.6	8.6
Fe	196	0.35	11.7	6.6
Zr_3Fe	122.5	0.37	6.1	-

Tableau 1 : Propriétés des composants de l'intermétallique.

Les essais de caractérisation dimensionnelle ont montrés des dispersions importantes en termes de porosité, d'épaisseur (tableau 2) et qui conduisent à des disparités significatives sur les propriétés élastiques obtenues par la loi des mélanges ou mesurées lors de la campagne expérimentale.

Composés intermétalliques	Epaisseur moyenne (mm)	Porosité moyenne (%)
Zr_3Fe	0.0311	25.5

Tableau 2 : Caractérisation dimensionnelle du ruban Zr_3Fe .

La figure 1 représente la contrainte de traction en fonction de la déformation pour les trois essais de caractérisation mécanique. D'après cette figure, les trois allures sont identifiables : un glissement est enregistré au début du chargement, puis l'éprouvette se déforme linéairement. Pour ce qui est de la rupture, la limite est quasi identique pour les trois essais. On peut enregistrer que la limite à rupture moyenne du Zr_3Fe est de 442 MPa.

Le module d'Young du composé Zr_3Fe est déterminé sur la base de l'essai 1 (figure 1). L'allure montre qu'une stabilité est enregistrée entre 7 et 18 s, ce qui nous permet de déduire la

valeur du module d'Young, c'est-à-dire 51 GPa (figure 2). Cette valeur est bien inférieure à la valeur obtenue par la loi des mélanges (122.5 GPa).

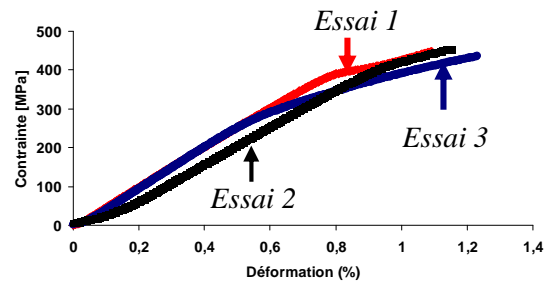


Figure 1 : Courbes de traction du composé Zr_3Fe .

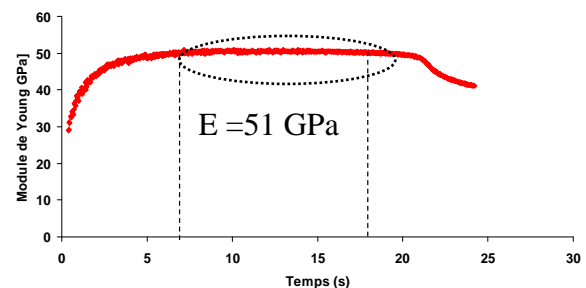


Figure 2 : Module de Young en fonction du temps de chargement de l'essai 6 obtenu pour le composé Zr_3Fe .

3. Analyse de sensibilité

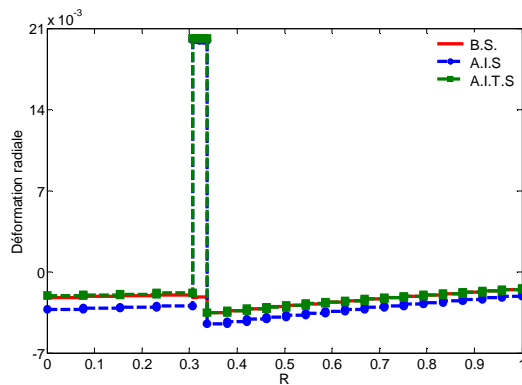
Nous limitons notre champ d'analyse à la sensibilité des déformations de la solution hybride de stockage aux changements des propriétés des rubans d'intermétalliques où l'écart entre le module d'Young théorique et expérimental est de 50 %. Sur cette base, nous essayons d'analyser l'effet de ces modifications sur une approche thermomécanique. La procédure de résolution analytique décrite dans [4] intègre l'analyse de la solution hybride. L'état initial de la structure est celui obtenu après le chargement de pression : on détermine l'effet de la présence de l'intermétallique en terme de déformations. Après le chargement de pression, on soumet l'intermétallique à un gradient de température afin d'atteindre le taux de gonflement désiré.

Le renforcement de la solution de stockage est effectué par une séquence d'enroulement $[\pm 60]_8$. Cette analyse de la solution de stockage avant et après fuite est résolue sous MATLAB. La paroi interne de la solution hybride est soumise à une pression de 40 MPa. Cette pression est choisie dans

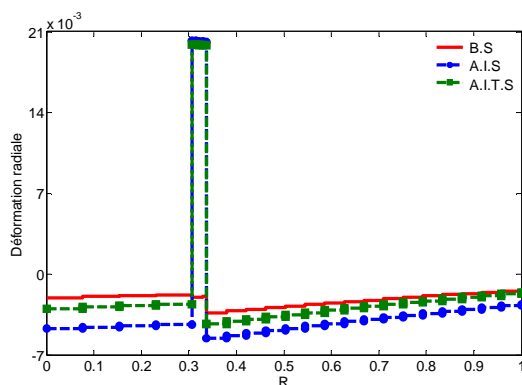
le but de ne pas dépasser la limite élastique de la couche intermétallique. Pour la même raison, où l'intermétallique Zr_3Fe devrait atteindre un gonflement de volume de 20%, on se place dans un environnement de fuite, qui correspond à un taux de gonflement près de 2.5 % de l'intermétallique. On représente trois situations de la solution : Avant fuite « B.S. », Après fuite : gonflement isotrope de l'intermétallique « A.I.S. » et Après fuite : gonflement isotrope transverse « A.I.T.S. »

3.1 Taux de variation de la déformation radiale

Pour le scénario « A.I.S », le même constat est enregistré pour les deux bases d'analyse avec des compressions plus importantes dans le cas de la loi des mélanges (figure 3). En revanche, dans la situation d'un gonflement isotrope transverse « A.I.T.S » une décompression est enregistrée au niveau du liner lors de la prise en compte des données expérimentales.



(a) Données expérimentales



(b) Loi des mélanges

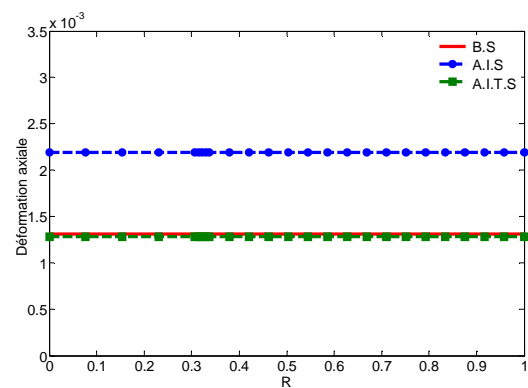
Figure 3: Sensibilité de la déformation radiale pour la Seq3 à l'effet des données expérimentales.

D'après ces taux de variations, on remarque que le scénario de gonflement isotrope est moins sensible

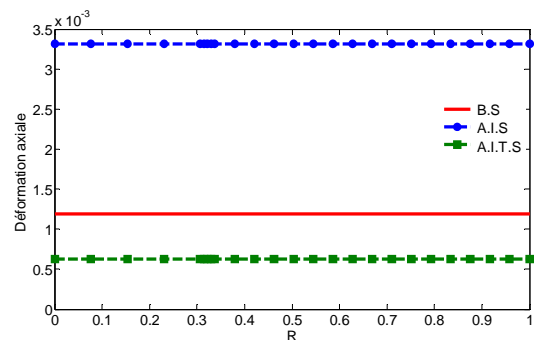
aux propriétés élastiques que le scénario de gonflement isotrope transverse.

3.2 Taux de variation de la déformation axiale

Par rapport à l'analyse basée sur la loi des mélanges, la variation de la déformation axiale est peu influencée par le changement des propriétés élastiques des rubans d'intermétallique (figure 4). En revanche, le rétrécissement axial lors du gonflement isotrope transverse est de 2 % avec les données expérimentales contre 46% avec les données de la loi des mélanges.



(a) Données expérimentales



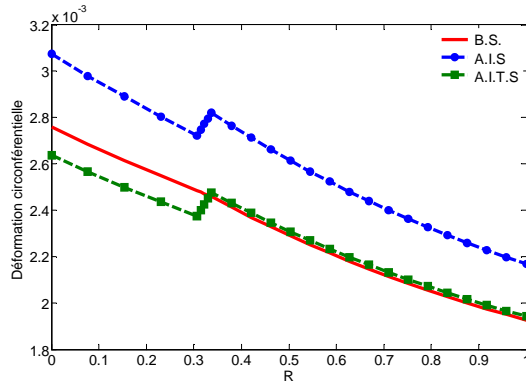
(b) Loi des mélanges

Figure 4: Sensibilité de la déformation radiale pour la Seq3 à l'effet des données expérimentales.

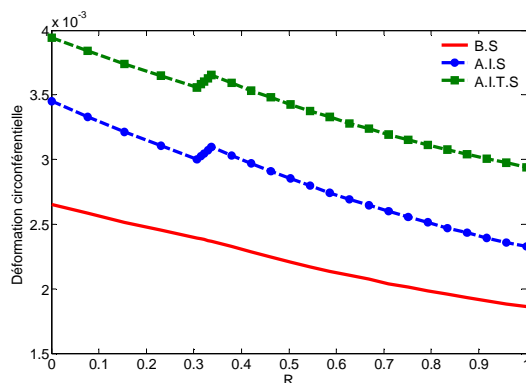
3.3 Taux de variation de la déformation circonférentielle

Le taux de variation de la déformation circonférentielle lors du scénario du gonflement isotrope « A.I.S » n'est pas avantageux en termes de fermeture des fissures pour les deux bases de

calcul (figure 5). Par contre, une compression du liner est enregistrée au niveau du liner dans la situation d'un gonflement isotrope transverse « A.I.T.S » et elle peut avoir un effet positive sur les fissures circonférentielles. Cette situation favorise le scénario « A.I.T.S » avec des données expérimentales.



(a) Données expérimentales



(b) Loi des mélanges

Figure 5: Sensibilité de la déformation radiale pour la Seq3 à l'effet des données expérimentales.

4. Conclusion

Ce travail a fait l'objet d'une étude de sensibilité paramétrique de l'analyse avant et après fuite de la solution hybride de stockage d'hydrogène aux propriétés élastiques de la barrière intermétallique. Cette étude repose sur une analyse comparative entre les résultats obtenus par l'utilisation de la loi des mélanges et par la donnée du module d'Young obtenue lors des essais de caractérisation dimensionnelle et mécanique des rubans intermétalliques en Zr_3Fe . La prise en compte de la donnée expérimentale lors de l'analyse avant et après fuite a permis d'avoir des effets plus

avantageux en termes de fermeture de fissures que ceux obtenus par la loi des mélanges.

Pour accentuer cette recherche sur une situation de fuite ou de gonflement local, l'analyse par éléments finis de la structure est indispensable. Cette analyse numérique permettra de voir plus clairement l'effet du gonflement local de l'intermétallique sur la totalité de la structure et plus particulièrement sur la fissure au niveau du liner.

5. Remerciement

La réalisation des essais de caractérisation dimensionnelle et mécanique a été effectuée par le soutien du LCMTR de Paris et qu'il trouve ici tout nos sincères remerciements.

6. Références bibliographiques

1. Nobuhiko T. et al. : *Hybrid hydrogen storage vessel, a novel high pressure hydrogen storage vessel combined with hydrogen storage material*, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 28, pp. 1121-1129 Elsevier eds, 2003.
2. Verijenco VE, Adali S, Tabakov PY. *Stress distribution in continuously heterogeneous thick laminated pressure vessels*. J Composite Structures; Vol. 54(2-3), pp. 371-377, 2001.
3. Vasiliev VV, Krinakov AA, Razin AF. *New generation of filament-wound composite pressure vessels for commercial applications*. J Composite Structure, Vol. 62(3-4), pp.449-459, 2003.
4. Hocine A., Chapelle D., Benamar A., Bezazi A.: *Analysis of a hybrid composite tank under pressure*, International Journal for Simulation and Multidisciplinary Design Optimization Vol.2, pp. 77-82, 2008.
5. Hocine A.: *Analyse et Modélisation d'une solution hybride de stockage d'hydrogène haute pression*. Thèse de doctorat Juin 2008.
6. Masanori H., Ryo H., Yoshinobu K., Kuniaki W.: *Hydrogen-induced disproportionation of Zr M (M5Fe, Co, Ni) 2 and reproporationation*, Journal of Alloys and Compounds Vol. 352, pp. 218-225, 2003.