

Essais instrumentés sur réservoir composite (type IV) sous pression soumis à une pression interne d'eau

Instrumented tests on composite pressure vessels (type IV) under to internal water pressure

*Eric Lainé¹, Jean-Christophe Dupré², Maxime Cruz¹, Franck Hesser²,
Jean-Claude Grandidier¹, Pierre Blanc-Vannet³*

1 : Institut Pprime, UPR3346 CNRS, ISEA-ENSMA, Université de Poitiers
ISEA-ENSMA - Téléport2 - 1 Av. Clément Ader - BP40109, F-86962 Futuroscope Chasseneuil Cedex
e-mail : eric.laine@ensma.fr et maxime.cruz@ensma.fr et grandidier@ensma.fr

2 : Institut Pprime, UPR3346 CNRS, Université de Poitiers, ISEA-ENSMA
SP2MI - Téléport2 - Bd Marie et Pierre Curie - BP30179, F-86962 Futuroscope Chasseneuil Cedex
e-mail : jean.christophe.dupre@univ-poitiers.fr et franck.hesser@univ-poitiers.fr

3 : Paris Innovation Campus, Air Liquide
1 Chemin de la porte des loges – BP126, F-78354 Jouy en Josas
e-mail : pierre.blanc-vannet@airliquide.com

Résumé

De nombreux travaux ont déjà été menés sur les réservoirs haute pression de type IV, tant d'un point de vue expérimental que numérique. La prédiction de la pression maximale avant éclatement, l'effet des cycles thermiques, la tolérance aux défauts et aux dommages, la tenue au feu, le collapse du liner sont des thématiques étudiées généralement numériquement à l'échelle des échantillons. Dans ces travaux le passage de l'éprouvette à la structure n'est pas complètement validée par une confrontation des modèles avec des mesures expérimentales à l'échelle du réservoir. Toutefois une corrélation avec la simulation numérique, nécessite de récolter un grand nombre d'informations souvent en associant plusieurs métrologies. Dans ce travail des essais instrumentés non-destructifs sur un réservoir soumis à une pression interne ont été réalisés couplés avec des mesures optiques (champs de déplacements 3D) et des mesures par émission acoustique pour comprendre la cinétique d'endommagement. Trois essais de charge-décharge sont réalisés à des vitesses de 1, 10 et 100MPa/min jusqu'à la pression de 87.5MPa, ils sont suivis d'un essai cyclé. Les résultats obtenus sont reproductibles et ils permettent de montrer que la vitesse de mise en pression n'a pas d'influence sur la cinétique de déformation et sur l'endommagement du réservoir.

Abstract

Much work has already been done on Type IV high-pressure vessels, both from an experimental and numerical point of view. The prediction of the maximum pressure before bursting, the effect of thermal cycles, defect and damage tolerance, fire resistance, liner collapse are topics generally numerically studied at the scale of the samples. In these works, the passage from the specimen to the structure is not fully validated by comparing the models with experimental measurements at the scale of the reservoir. However, this correlation with numerical simulation requires collecting a large amount of information, often by combining several metrological studies. In this work, non-destructive instrumented tests on a tank subjected to internal pressure were performed coupled with optical measurements (3D displacement fields) and acoustic emission to understand the damage kinetics. Three load-unload tests are performed at speeds of 1, 10 and 100MPa/min up to 87.5MPa pressure, followed by a cyclic test. The results obtained are reproducible and show that the pressure loading rate has no influence on the deformation kinetics and on the damage of the tank.

Mots Clés : réservoir HP type IV, essais mécaniques, pression interne, mesures optiques, émission acoustique
Keywords : HP tank type IV, mechanical tests, internal pressure, optical measurements, acoustic emission

1 Introduction

Les réservoirs composites sous pression sont aujourd'hui un moyen mature de stocker l'hydrogène comprimé. La combinaison d'un faible poids et d'une résistance mécanique élevée les rendent

particulièrement adaptés aux applications nécessitant de grandes quantités de gaz dans un volume réduit et transportable, comme les réservoirs de carburant automobile ou les remorques de transport de gaz [1]. Cette étude s'intéresse à un réservoir haute pression de type IV (hydrogène) constitué d'une enveloppe interne appelée liner en polymère sur lequel sont bobinées les fibres de carbone imprégnées d'une résine thermodurcissable. La tenue mécanique est assurée par le composite, le liner assurant une grande partie de l'étanchéité au gaz. De nombreux travaux ont déjà été menés sur ces réservoirs, tant d'un point de vue expérimental que numérique. La prédiction de la pression maximale avant éclatement [2], l'effet des cycles thermiques [3-6], la tolérance aux défauts et aux dommages [7-9], la tenue au feu [10], le collapse du liner [11-12] sont des thématiques étudiées généralement à l'échelle des échantillons et numériquement. Mais de plus en plus, des essais sur réservoirs sont menés afin de comprendre, par exemple, les mécanismes de tolérance aux dommages par la technique d'émission acoustique [13-14]. Dans ces travaux le passage de l'éprouvette à la structure n'est pas complètement validée par une confrontation des modèles avec des mesures expérimentales à l'échelle du réservoir. Toutefois une corrélation avec la simulation numérique, nécessite de récolter un grand nombre d'informations en associant des métrologies comme par exemple une mesure de champ en surface à l'échelle du réservoir et une analyse par émission acoustique.

Pour la mesure de champ, une mesure 2D (DIC [15,16] ou suivi de marqueurs [15,17]) n'est pas adaptée car le réservoir n'est pas plan. Le champ de déplacement mécanique est 3D sur une structure courbe avec un gonflement généralisé de celle-ci, c'est pourquoi une technique stéréoscopique, qui permet d'obtenir les déplacements 3D à la surface d'une structure de forme quelconque [15,18] a été retenue. Cette technique stéréoscopique de suivi de marqueurs permet d'obtenir les déplacements et les déformations sur la surface en des points particuliers que l'on peut faire correspondre directement au maillage utilisé pour les simulations numériques. L'émission acoustique est devenue une technique importante d'évaluation non destructive (NDE) dans les structures travaillant sous pression par gaz ou liquide [13-14]. L'utilisation de l'émission acoustique (EA) pour la détection des dommages dans les réservoirs sous pression en composite à fibres de carbone a été évaluée pour les conditions de charge de pression interne constante et cyclique du gaz [14]. L'EA est en mesure de détecter l'amorce et l'accumulation d'événements dommageables, et il est possible de distinguer de façon fiable la rupture des fibres de carbone à d'autres événements d'endommagements microscopiques [19-21].

Dans ce travail des essais instrumentés non-destructifs sur un réservoir haute pression soumis à une pression interne d'eau couplés avec des mesures optiques (champs de déplacements 3D) et d'émission acoustique sont réalisées. Le paragraphe 2 présente le réservoir haute pression de type IV. Le système expérimental, la méthode de mesure optique (champs de déplacements 3D) et la technique d'émission acoustique sont détaillés au paragraphe 3. Le paragraphe 4 expose les résultats des essais de charge-décharge réalisés à des vitesses de 1, 10 et 100MPa/min jusqu'à la pression de 87.5MPa et d'un essai cyclé. Les résultats des mesures optiques et acoustiques sont discutés.

2 Structure expérimentale

Le réservoir sous pression (Fig. 1) utilisé pour ces travaux a été fabriqué spécialement à des fins de R&D et n'est pas disponible dans le commerce. Il a été conçu selon les normes pour les bouteilles transportables [22], c'est-à-dire en visant une pression d'éclatement de 3 fois la pression de service de 70MPa. Il a un volume interne de 2.4l. Le rapport épaisseur sur diamètre extérieur (t/D) de la bouteille est de 0.019. Avant cette campagne d'essais, cette bouteille a été utilisée dans le cadre d'un projet ANR (COLLINE) où elle a été soumise à un essai de décompression rapide d'hydrogène. Celle-ci a été pressurisée à 70MPa puis vidée à 0.07 MPa/min jusqu'à la pression atmosphérique. Ce réservoir est très similaire au #05 présenté dans [23].

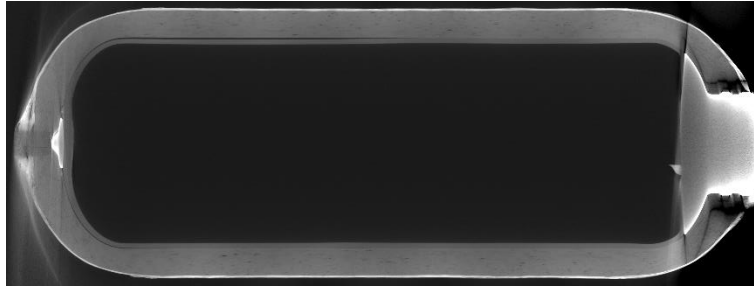


Fig. 1. Tomographie du réservoir haute pression H2 type IV

3 Procédure expérimentale

3.1 Méthodologie (ENDOMAT)

Le banc d'essai expérimental Endomat (Fig. 2a) met en œuvre une machine d'essai mécanique tri-axiale permettant de réaliser des essais de traction-compression, torsion couplés ou non à une pression interne. Les valeurs limites de la machine sont de 1200 kN en traction-compression, 55 kN en torsion et 1200bar en pression. Les dimensions utiles de la machine d'essai sont 700x700x1800mm avec un volume de 882l, ce qui permet de fixer des structures de grandes dimensions sur le banc d'essai. Les trois axes de sollicitations imposent des chargements en statique et en dynamique éventuellement synchronisés, sur une gamme de fréquence allant jusqu'à 10Hz selon l'amplitude des efforts pilotés. Dans ce travail, seul le chargement en pression est utilisée.

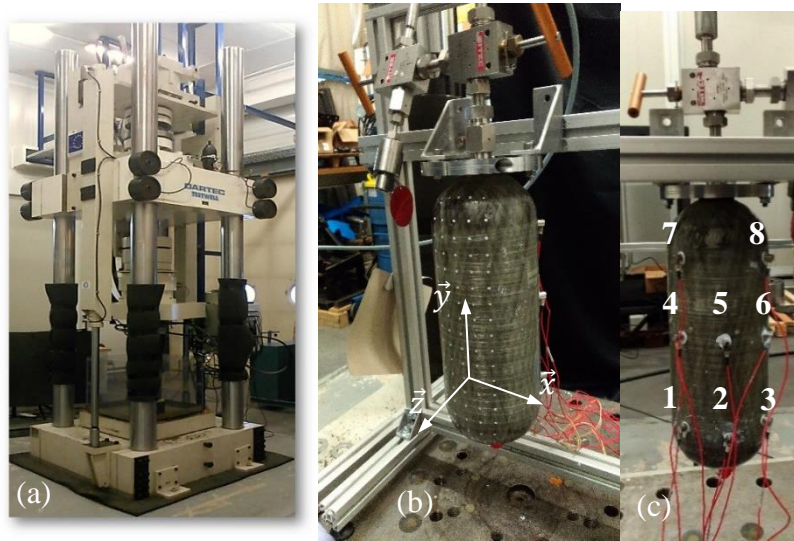


Fig. 2. (a) ENDOMAT - (b) Réservoir coté mesure optique - (c) Réservoir coté capteurs d'émission acoustique

L'axe pression possède deux dispositifs en parallèle, associant la puissance hydraulique en huile avec le circuit hydraulique en eau injectée dans la structure à tester. Le regroupement de deux accumulateurs de transfert (huile/eau) transfère la pression fournie par le circuit en huile à l'aide de vessies (pression de service des groupes hydrauliques : 300bar). Le rapport de transfert de la pression est alors de 1 mais ce système a l'avantage de pouvoir fournir de hauts débits (volume déplaçable : 24L ; débits des servovalves de pilotage: 520L/min et 75L/min) répondant à des problématiques de structures subissant de grandes déformations. Le second dispositif est un suppresseur qui multiplie la pression par 4 grâce aux sections du piston le composant. Le système peut convertir la pression de service en huile de 300bar à une pression de 1200bar dans le circuit en eau mais pour un plus faible débit (Volume déplaçable : 5L ; débit de la servovalve de pilotage: 20L/min). Le banc d'essai est composé d'électronique de pilotage DOLI.

3.2 Mesure optique et analyse [15,18]

Le principe de la méthode de suivi de marqueur stéréoscopique consiste à enregistrer l'image de la surface de l'objet (Fig. 2b) à l'aide de deux caméras (Fig. 3) au cours du chargement. La première étape d'analyse consiste à calculer pour les deux séries d'images les coordonnées $\bar{X}_C=(x_g, y_g)$ du centre géométrique des marqueurs [16] :

$$\bar{X}_C = \begin{bmatrix} \frac{\sum_i x_i(I_i - I_s)}{\sum_i (I_i - I_s)} \\ \frac{\sum_i y_i(I_i - I_s)}{\sum_i (I_i - I_s)} \end{bmatrix} \quad (1)$$

avec I_i l'intensité en niveau de gris du $i^{\text{ème}}$ pixel de coordonnées (x_i, y_i) . Ce calcul se fait sur une zone préalablement définie de façon automatique autour de chaque marqueur. Une intensité seuil est aussi définie pour chaque marqueur permettant de le repérer. La seconde étape est une procédure de triangulation qui consiste à retrouver sur l'image de la première caméra et la seconde les mêmes zones ou marqueurs (phase d'appariement) ce qui donne les coordonnées 3D du centre des taches \bar{X}_R dans le repère (x, y, z) défini sur la Fig. 2b.

$$\begin{cases} \bar{R}_1 \bar{X}_R = \bar{G}_1 \bar{X}_{C1} \\ \bar{R}_2 \bar{X}_R = \bar{G}_2 \bar{X}_{C2} \end{cases} \quad (2)$$

\bar{X}_{C1} et \bar{X}_{C2} sont les coordonnées des marqueurs dans le repère des deux caméras, \bar{R}_1 , \bar{R}_2 sont des matrices de rotation contenant les orientations des caméras dans l'espace et \bar{G}_1 , \bar{G}_2 sont des matrices contenant les grandissements et positions des caméras. Ces paramètres sont déterminés au préalable par une procédure de calibration consistant à analyser une mire de points de géométrie connue. L'évolution au cours du temps de ces coordonnées permet de calculer les déplacements de la surface de l'éprouvette, puis par différences finies les déformations. Pour cela 4 marqueurs formant une croix sont utilisés et l'hypothèse que la surface est localement plane est faite. Ces calculs ainsi que l'acquisition des images sont réalisés grâce à un logiciel développé au laboratoire « deftac 3D ». La visualisation 3D en temporelle est réalisée par le logiciel « ParaView ». Ce dernier offre la possibilité de visualiser un champ de déplacements ou de déformations en interpolant entre les points de mesure par interpolation bilinéaire. Il faut alors faire l'hypothèse d'un champ continu. Les marqueurs sont réalisés à l'aide d'un pochoir qui permet d'obtenir un marquage régulier sur la surface. Ils couvrent 120° de la partie cylindrique. Les incertitudes de mesure sont déterminées par un essai de déplacement connu de la mire d'étalonnage. On obtient en déplacement un écart-type dans les directions x, y de 9/100mm et 20/100mm dans la direction z hors-plan. Ce qui fait en déformation une incertitude de 0.01% pour ce même test.

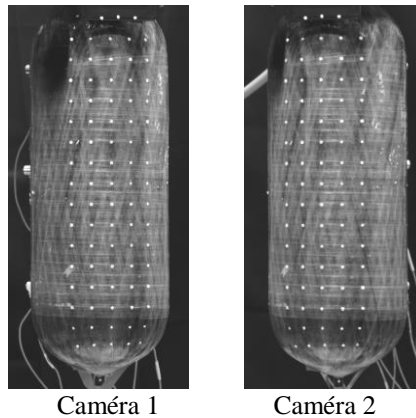


Fig. 3. Images enregistrées par les deux caméras

3.3 Emission acoustique pour les essais sur structure et analyse

Le contrôle des dommages s'effectue à l'aide de la mesure des émissions acoustiques. Un système express à 8 canaux Mistras Group 8 canaux est utilisé pour enregistrer les signaux EA sur le réservoir. Tous les essais sont effectués avec huit capteurs piézoélectriques acoustiques avec un préamplificateur PAC 1220A d'un gain de 40 dB. Ils sont positionnés sur le réservoir avec de la graisse silicone et fixés avec du ruban adhésif (Fig. 2c). Les capteurs sont positionnés sur 1/3 du périmètre du cylindre (120°) et sur une hauteur correspondant à la partie cylindrique. Les capteurs 1,2 et 3 sont placés à l'intersection entre la partie cylindrique et le dôme inférieur ; les capteurs 4,5 et au milieu de la hauteur de la partie cylindrique et les capteurs 7 et 8 à l'intersection entre la partie cylindrique et le dôme supérieur (Fig. 2c). Lors de l'enregistrement de signaux EA, il est choisi un seuil de détection (32 dB) en dessous duquel aucun signal n'est enregistré. De la même manière, la propagation est évaluée par la procédure de rupture de la mine [24-25]. Les paramètres dépendant du temps, tels que l'amplitude, l'énergie, la durée, le temps de montée, le nombre de comptages, etc. sont calculés en temps réel par le système d'acquisition. Directement liées à la forme des formes d'onde, ces caractéristiques sont largement utilisées pour l'analyse EA. De plus, l'acquisition est synchronisée avec la pression interne appliquée à la bouteille (signal 0-10V).

La première analyse qui peut être faite lors d'un test à émission acoustique, est de représenter l'ensemble des signaux enregistrés sous la forme amplitude - nombre de coup. Dans cette représentation les signaux avec une faible amplitude et un grand nombre de points correspondant au bruit mécanique sont éliminés, ainsi que ceux avec une grande amplitude et un petit nombre de points correspondant au bruit électromagnétique [19]. Ensuite, il n'est pas simple de traiter les différents paramètres des signaux EA d'autant plus lorsque que la structure est complexe comme le réservoir de par sa géométrie et l'empilement d'un grand nombre de pli avec des orientations très différentes. On trouve différentes approches dans la littérature. De nombreuses études ont tenté de mettre au point des méthodes de différenciation des mécanismes sources des signaux d'émission acoustique par l'emploi d'un seul paramètre extrait des formes d'ondes. Si il apparaît qu'à partir de l'amplitude des signaux d'émission acoustique, il est possible de classifier les modes d'endommagement les plus fréquemment rencontrés dans les composites, (fissuration matricielle, décohésion-délamination et rupture de fibres), il est cependant difficile de définir des bornes précises (en amplitude) des zones d'endommagement. Ces valeurs peuvent varier selon le matériau, le type d'essai, ... Des travaux plus récents ont montré qu'une analyse paramétrique des signaux d'EA, en utilisant l'amplitude, le temps de montée, la durée et l'énergie des signaux permettait d'identifier différents types de signaux dénommés type A, B, C et D [20-21] pour classifier les mécanismes.

4 Résultats et Discussions

4.1 Essais statiques à différentes vitesses

Dans un premier temps, trois essais statiques de charge-décharge avec deux cycles ont été réalisés. Seules les vitesses de chargement et de déchargement sont différentes : 1, 10 et 100MPa/min. Les paliers à 87.5MPa et 0MPa sont de 10mn pour les trois essais. La première grandeur importante à exploiter est l'allongement du réservoir. L'allongement global est obtenu grâce à un marqueur placé sous le réservoir (Fig. 4a). La Fig. 4b montre que pour les trois vitesses de chargement-déchargement le comportement global est identique. Pour une pression de 87.5MPa, l'allongement du réservoir est d'environ 0.73mm pour une hauteur du réservoir de 390mm. La réponse est parfaitement linéaire sans hystérésis. Les trois courbes se superposent, ainsi que les phases de charges et décharges.

Les Fig. 5a et Fig. 5b présente respectivement le champ global de déplacement pour les 3 composantes ainsi que les déformations à la surface du réservoir pour la pression maximale.

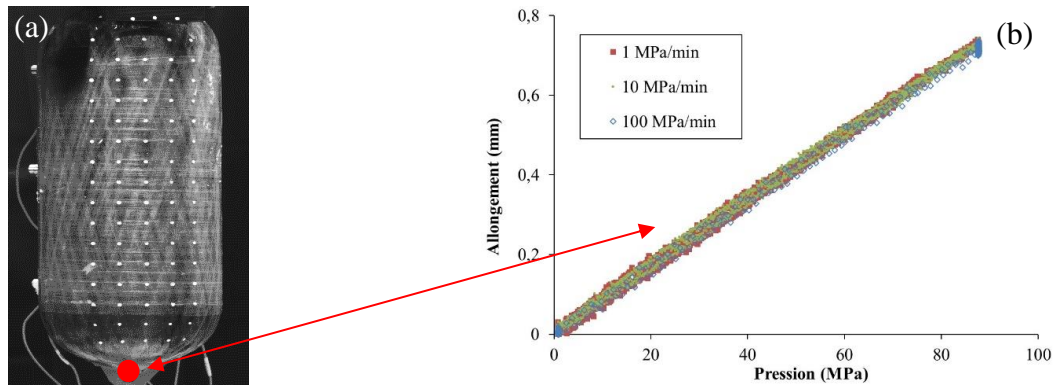


Fig. 4. (a) réservoir - (b) Allongement global en fonction de la pression pour les trois vitesses de chargement

Sur la Fig. 5a dx , dy et dz représente respectivement les déplacements circonférentiels, axiaux et tangentiels. Le champ des déplacements circonférentiels (dx) montre une parfaite symétrie dans les mesures. A $+60^\circ$ et -60° de l'axe centrale, les déplacements sont respectivement de 0.15 et -0.15mm. Le champ de déplacement tangentiel (dz) présente un champ quasiment homogène dans la partie cylindrique du réservoir avec un déplacement moyen de 0.30mm. A partir des champs de déplacements, les champs de déformations tangentielles ($E11$) et axiales ($E22$) sont calculés et présentés sur la Fig. 5b. Les champs de déformations tangentielles et axiales sont homogènes dans la partie cylindrique de l'ordre respectivement de $5 \cdot 10^{-3}$ et de $1.5 \cdot 10^{-3}$. Par contre la Fig. 5b montre des déformations axiales plus importantes, de l'ordre de $2.5 \cdot 10^{-3}$, localisée au niveau des intersections entre la partie cylindrique et les dômes. La tomographie de réservoir présentée à la Fig. 5c montre une diminution de l'épaisseur du réservoir dans cette zone. Cela peut justifier un champ de déformations axiales localisé et plus élevé.

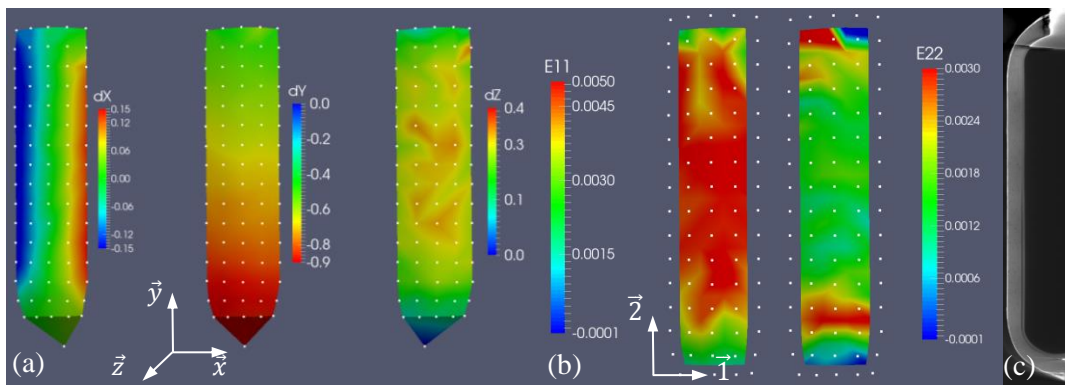


Fig. 5. (a) champ de déplacements et (b) de déformations à la pression maximale (87.5MPa) (1MPa/min) - (c) Tomographie d'1/2 du réservoir.

Sur la Fig. 6 est représenté le nombre de coup en fonction de l'amplitude pour les trois vitesses de chargement et les deux cycles imposés. Il apparaît que lors des trois essais, les réponses acoustiques ne sont pas perturbées par des bruits mécaniques ni par des bruits électromagnétiques. La Fig. 7 montre les cycles de pression et les amplitudes des signaux acoustiques en fonction du temps pour les trois vitesses de chargement. Les Fig. 6 et Fig. 7 montrent que les amplitudes varient très majoritairement entre 40 et 60dB. Pour les trois essais, la proportion de hits compris entre 40 et 60dB est d'environ 98.5% des hits. La Fig. 8 présente l'évolution du nombre cumulé de signaux EA pour les trois essais et la Fig. 9 la pression en fonction du nombre cumulé de signaux EA. Lors de la première montée à 1MPa/mn, les Fig. 8 et 9 montrent qu'il y a un grand nombre de hits, plus du double par rapport à la seconde montée. L'activité acoustique lors de la seconde montée est quasiment la même que lors des cycles pour les essais à 10 et 100MPa où les courbes sont identiques. Pourtant, le réservoir avait été timbré (107.5MPa) au préalable puis avait été soumis à

70MPa d'hydrogène quelques semaines avant. Il est possible que le temps entre les essais, le conditionnement, le changement d'environnement justifie ces observations. La Fig. 10 présente la réponse acoustique de la durée et de l'énergie absolue des signaux EA en fonction de l'amplitude pour les trois vitesses de mise en pression, en distinguant les deux cycles. L'exploitation de ces grandeurs [20-21] montre que l'amplitude des hits est comprise entre 40 et 70MPa (99.9%). Les signaux sont caractérisés par des formes d'onde de faible durée, et une énergie relativement faible. Ce sont des signaux de type A [21], qui sont la signature acoustique de la fissuration matricielle. Les signaux de type B correspondent à la décohésion interfaciale fibre/matrice. Ils représentent 0.1% des signaux acoustiques capturés lors des trois essais. De plus, ils apparaissent à chaque fois lors du second cycle. Enfin, la Fig. 11 montre le nombre cumulé de signaux EA pour chaque capteur lors des trois essais. Mise à part le premier cycle de l'essai à 1MPa/min, le second et les deux autres essais à 10 et 100MPa/min, conduisent à une signature acoustique identique pour l'ensemble des zones. Ainsi, les capteurs 7 et 8 (Fig. 2c) sont ceux qui captent le plus de signaux EA, approximativement 1350 et 1600 respectivement par cycle. Les capteurs 1,2 et 3 placés à l'intersection de la partie cylindrique et du dôme inférieur (Fig. 2c) captent entre 130 et 170 signaux EA par cycle. Enfin, les capteurs 4, 5 et 6 placés au milieu de la hauteur du cylindre ont des réponses acoustiques différentes particulièrement le 4 et dans une moindre mesure le 5. A ce stade, il n'est pas possible de dégager une raison particulière. Enfin, notons que si les premiers signaux acoustiques apparaissent aux alentours de 2MPa, l'activité acoustique accélère significativement à partir des 50MPa (Fig. 8, 9 et 11).

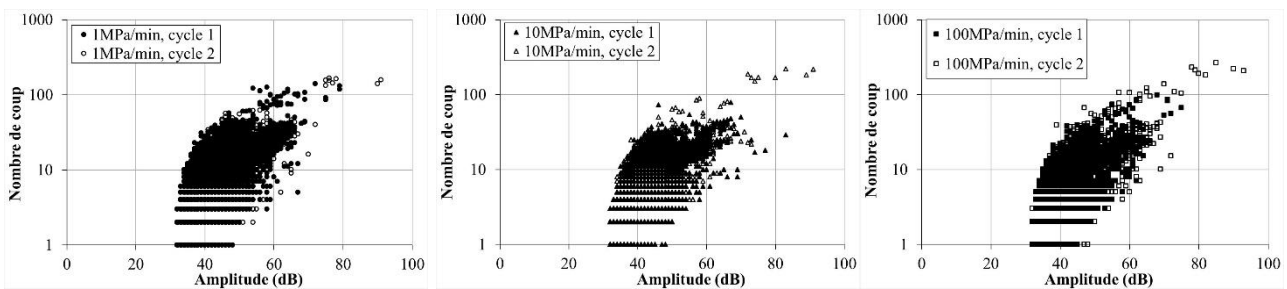


Fig. 6. Nombre de coup en fonction de l'amplitude EA (dB) pour les trois vitesses de mise en pression

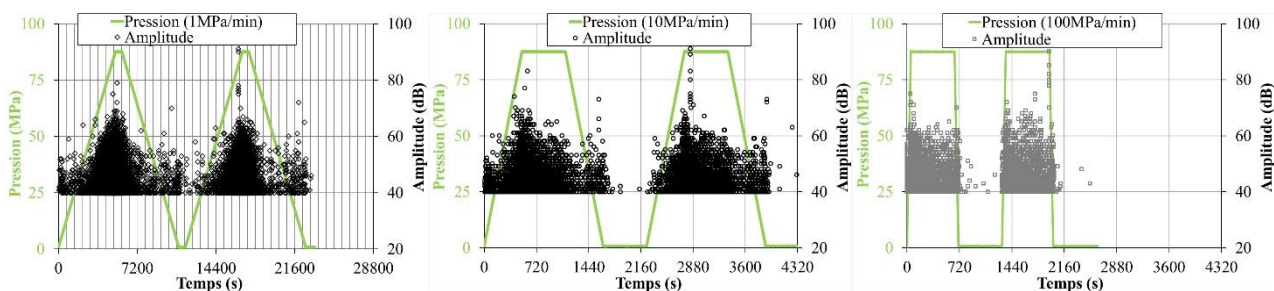


Fig. 7. Amplitude (dB) et pression (MPa) en fonction du temps pour les trois vitesses de mise en pression

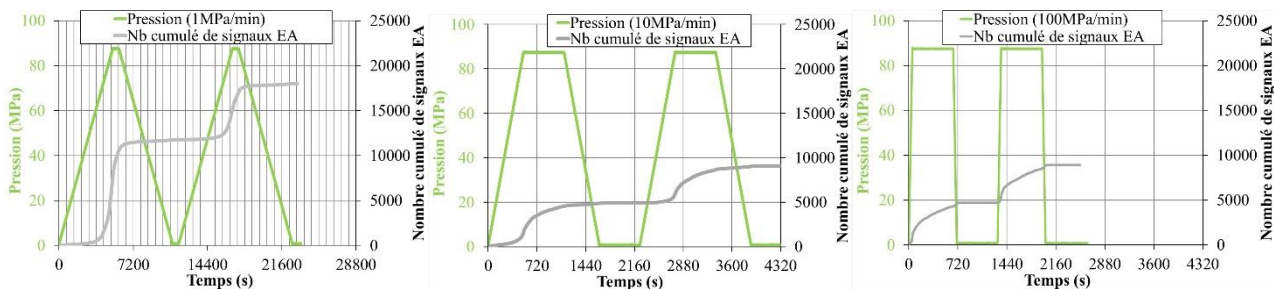


Fig. 8. Nombre cumulé de signaux EA et pression en fonction du temps pour les trois vitesses de mise en pression

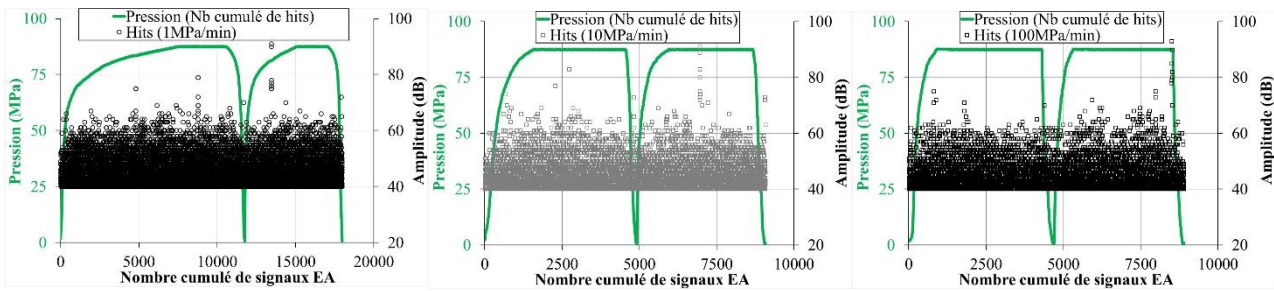


Fig. 9. Amplitude et pression en fonction du nombre cumulé de signaux EA pour les trois vitesses de mise en pression

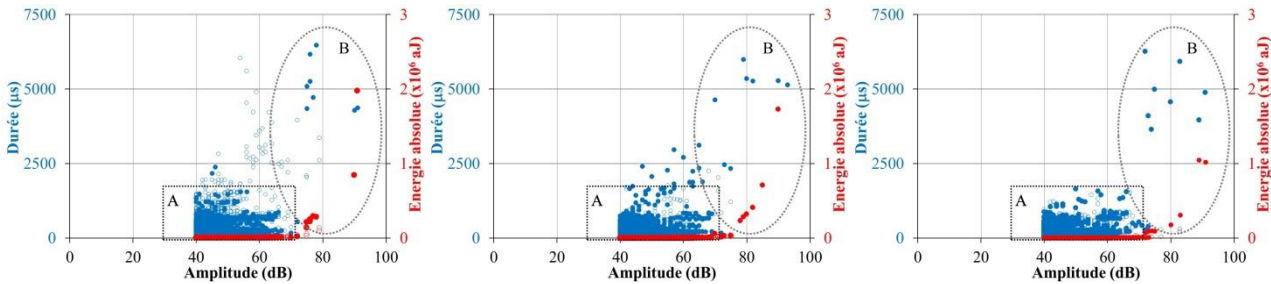


Fig. 10. Réponse acoustique de la durée et de l'énergie absolue des signaux EA en fonction de l'amplitude pour les trois vitesses de mise en pression (rond vide : 1^{er} cycle, rond plein : 2nd cycle)

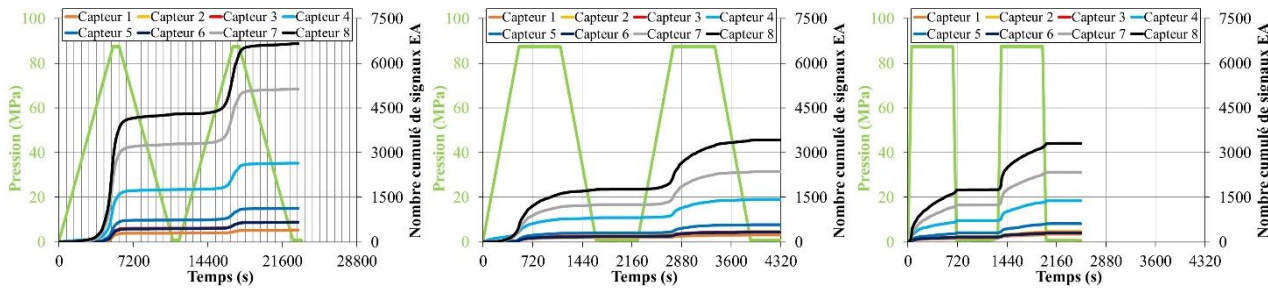


Fig. 11. Réponse acoustique des 8 capteurs EA - Nombre cumulé de signaux EA et pression en fonction du temps pour les trois vitesses de mise en pression

4.2 Essai cyclique

Un essai cyclique de 240 cycles triangulaires (palier de 2s) à une vitesse de 10MPa/min a été réalisé. La Fig. 12 montre l'allongement total du réservoir en fonction du temps et de la pression. L'allongement est quasi-stable, il oscille entre 0.72 et 0.73mm. La Fig. 13 présente les cartographies des déformations du cycle 1 (à 87.5MPa et à 0MPa) et du dernier cycle (à 87.5MPa et à 0MPa). Aucune évolution dans le temps des déformations n'est à noter. On retrouve des mesures (et des ordres de grandeurs) parfaitement similaires à celles obtenues lors des essais précédents. L'exploitation des signaux acoustiques (non présentée ici) corrobore les résultats issus des mesures optiques. L'ensemble des amplitudes mesurées est compris entre 40 et 60dB (99.95%).

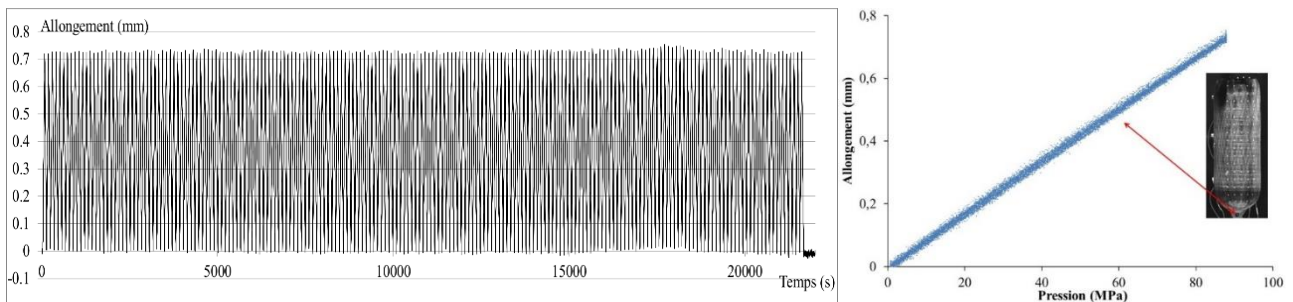


Fig. 12. Allongement global en fonction du temps - Allongement global en fonction de la pression

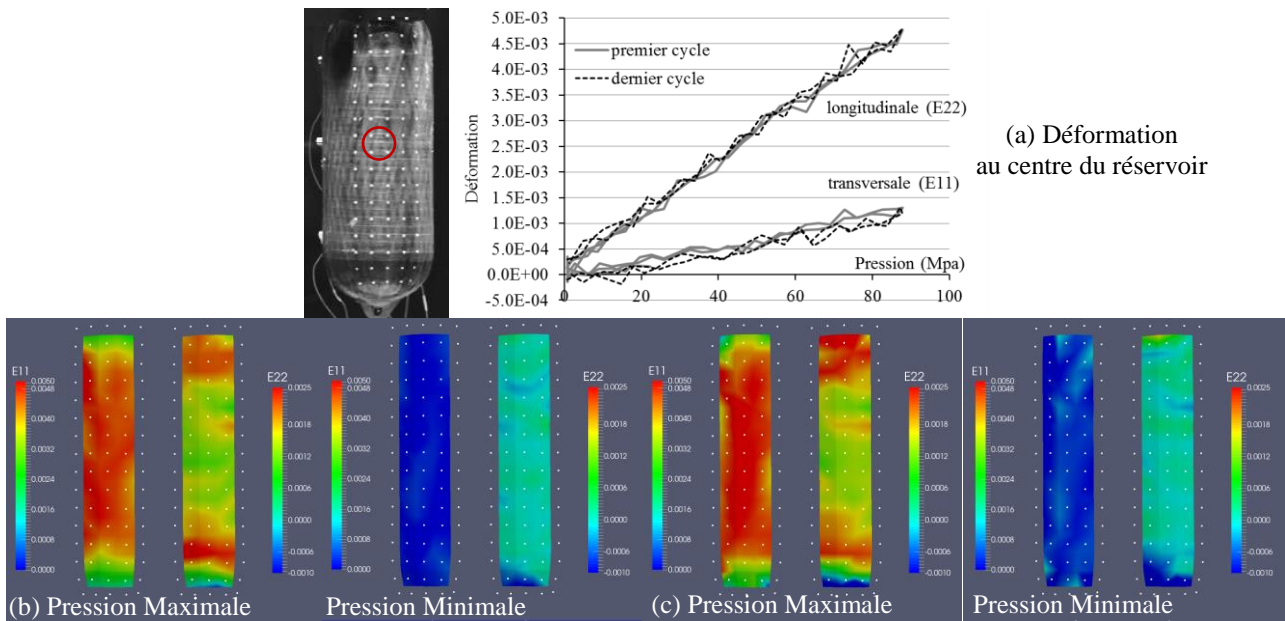


Fig. 13. Déformations en fonction de la pression pour une zone centrale (a) et sur toute la surface observée - 1^{er} cycle (b) et dernier cycle (c)

5 Conclusion

L'objectif de cette étude était la mise en œuvre d'un essai sur un réservoir de type IV en couplant l'émission acoustique (déjà utilisée) avec une méthode de mesure optique sans contact afin de compléter les informations en vue d'une corrélation avec la simulation numérique. L'ensemble des essais réalisés montrent l'intérêt de coupler ces deux types de mesures. Bien que les déplacements (et les déformations) soient petits, la technique de suivi de marqueurs stéréoscopique montre sa fiabilité à obtenir des mesures reproductibles sur une structure complexe (réservoir cylindrique).

Les résultats des trois essais de charge –décharge qui ont été réalisés à des vitesses de 1, 10 et 100MPa/min jusqu'à la pression de 87.5MPa montrent que la vitesse de mise en pression (et en vidange) n'a pas d'influence sur la cinétique de déformation du réservoir, ni sur l'endommagement de la matrice. Le mécanisme mesuré dans l'ensemble des essais correspond à de la fissuration matricielle. Selon le critère à un seul paramètre, ce mécanisme est mesuré généralement entre 40 et 60dB. Les amplitudes acoustiques mesurées lors des différents essais entre 40 et 60dB représentent 98.5% des signaux EA captés. En réalisant une analyse paramétrique [21-22], les amplitudes acoustiques mesurées entre 40 et 70dB représentent 99.9% des signaux EA captés. Les mesures optiques viennent conforter cette analyse. Le comportement du réservoir est parfaitement linéaire, reproductible, sans effet de la vitesse de la mise en pression dans la gamme (1 à 100MPa/min). De plus, les cartographies des champs viennent confirmer l'homogénéité des déplacements (et des déformations) dans la partie cylindrique lors du mise en pression. Enfin, ces cartographies nous apprennent que les intersections entre la partie cylindrique et les dômes sont des zones où les déformations sont les plus élevées. Cela devra être confirmé par une étude numérique fine de mise en pression du réservoir tant d'un point de vue géométrique que descriptif de la partie composite.

Remerciements

Ce travail a bénéficié d'une aide de l'Etat gérée par l'Agence Nationale de la Recherche au titre du programme « Investissements d'avenir » portant la référence ANR-11-EQPX-0018 pour l'équipement d'excellence GAP. Le réservoir utilisé a été réalisé en partie grâce au financement de l'Agence Nationale de la Recherche dans le cadre du projet Colline - <http://www.agence-nationale-recherche.fr/?Project=ANR-13-RMNP-0007>.

Références

- [1] H. Barthélémy, M. Weber, F. Barbier « Hydrogen storage: Recent improvements and industrial perspectives », *Int J Hydrogen Energy* Vol. 42 n° 11, pp. 7254-7262, 2017.
- [2] J.P. Berro Ramirez, D. Halm et al. « 700 bar type IV high pressure hydrogen storage vessel burst – Simulation and experimental validation », *Int J Hydrogen Energy* Vol. 40 n°38, pp. 13183-13192, 2015.
- [3] B. Gentilleau, M. Bertin, F. Touchard, J.-C. Grandidier « Stress analysis in specimens made of multi-layer polymer/composite used for hydrogen storage application: comparison with experimental results », *Composite structures* Vol. 93 n°11, pp. 2760-2767, 2011.
- [4] B. Gentilleau, F. Touchard, J.-C. Grandidier « Numerical study of influence of temperature and matrix cracking on type IV hydrogen high pressure storage vessel behavior », *Composite Structures* Vol. 11, pp. 98-110, 2014.
- [5] B. Gentilleau, F. Touchard, J.-C. Grandidier, D. Mellier « Numerical Determination and Experimental Validation of a Technological Specimen Representative of High-Pressure Hydrogen Storage Vessels », *Mechanics of Composite Materials* Vol. 51 n°4, pp. 465-478, 2015.
- [6] J.P. Berro Ramirez, D. Halm, J.-C. Grandidier et al. « Experimental study of the thermomechanical behavior of wound notched structures », *Int J Hydrogen Energy* Vol. 40 n°38, pp. 13148-13159, 2015.
- [7] J.P. Berro Ramirez, D. Halm, J.-C. Grandidier, S. Villalonga « A fixed directions damage model for composite materials dedicated to hyperbaric type IV hydrogen storage vessel – Part I: Model formulation and identification », *Int J Hydrogen Energy* Vol. 40 n°38, pp.13165-13173, 2015.
- [8] J.P. Berro Ramirez, D. Halm, J.-C. Grandidier, S. Villalonga « A fixed directions damage model for composite materials dedicated to hyperbaric type IV hydrogen storage vessel – Part II: Validation on notched structures », *Int J Hydrogen Energy* Vol. 40 n°38, pp.13174-13182, 2015.
- [9] J.P. Berro Ramirez, D. Halm, J.-C. Grandidier, « Assessment of a damage model for wound composite structures by acoustic emission », *Composite Structures* Vol. 214, pp.414-421 2019.
- [10] D. Halm, F. Fouillen, E. Lainé et al. « Composite pressure vessels for hydrogen storage in fire conditions: Fire tests and burst simulation », *Int J Hydrogen Energy* Vol. 42 n°31, pp. 20056-20070, 2017.
- [11] J. Pepin, E. Lainé, J.-C. Grandidier, G. Benoît, D. Mellier, M. Weber, C. Langlois « Replication of liner collapse phenomenon observed in hyperbaric hydrogen storage composites pressure vessels with a polymer liner by explosive decompression experiments », *Int J Hydrogen Energy* Vol. 43 n°9, pp. 4671-4680, 2018.
- [12] J. Pepin, E. Lainé et al. « Determination of key parameters responsible for polymeric liner collapse in hyperbaric type IV hydrogen storage vessel », *Int J Hydrogen Energy* Vol. 43 n°33, pp. 16386-16399, 2018.
- [13] H.Y. Choua, A.P. Mouritz, M.K. Bannister, A.R. Bunsell « Acoustic emission analysis of composite pressure vessels under constant and cyclic pressure », *Composites: Part A* Vol. 70, pp. 111-120, 2015.
- [14] J.R. Kwon, G.J. Lyu, T.H. Lee, J.Y. Kim « Acoustic emission testing of repaired storage tank », *International Journal of Pressure Vessels and Piping* Vol. 78, pp. 373-378, 2001.
- [15] F. Brémand, M. Cottron, P. Doumalin, J.C. Dupré, A. Germaneau, V. Valle « Mesures en mécanique par méthodes optiques, Techniques de l'ingénieur, 2. R1850, 2011.
- [16] J.-C. Dupré, P. Doumalin, H. A. Hussein, A. Germaneau et al. « Displacement Discontinuity or Complex Shape of Sample: Assessment of Accuracy and Adaptation of Local DIC Approach », *Strain* Vol. 51, pp. 391–404, 2015.
- [17] N. Bretagne, V. Valle and J.-C. Dupré « Recent developments of the mark tracking technique: application to strain field and volume variation measurements », *NDT & E International* Vol. 38 n°4, pp. 290-298, 2005.
- [18] A. Germaneau, P. Doumalin, J.-C. Dupré, C. Brèque, F. Brémand et al. « Experimental analysis of mechanical response of stabilized occipitocervical junction by 3D mark tracking technique », *European Physical Journal*, 14th International Conference on Experimental Mechanics, Poitiers (France), EPJ Web of Conferences **6**, 21004, 2010.
- [19] A. Malpot « Etude du comportement en fatigue d'un composite à matrice polyamide renforcé d'un tissu de fibres de verre pour application automobile », Ph.D thesis, ISAE-ENSMA (Poitiers), 2017.
- [20] S. Huguet, N. Godin, R. Geartener et al. « Use acoustic emission to identify damage modes in glass fibre reinforced polyester. », *Composites Science and Technology* Vol. 62, pp 1433-1444, 2002.
- [21] H. Nechad « Evaluation de l'endommagement et de la rupture de matériaux hétérogènes par ultrasons et émission acoustique : Estimation de la durée de vie restante », Ph.D thesis, INSA de Lyon, 2004.
- [22] NF EN 12245 : 2009. Bouteilles à gaz transportables, Bouteilles entièrement bobinées en matériaux composites.
- [23] P. Blanc-Vannet, P. Papin, M. Weber et al. « Sample scale testing method to prevent collapse of plastic liners in composite pressure vessels », *Int J Hydrogen Energy* (Special Issue ICHS 2017), Vol. 44 n°17, pp. 8682-8691, 2019.
- [24] A. Nielsen « Acoustic Emission Source based on Pencil Lead Breaking », *The Danish Welding Institute Publication* Vol. 80, pp. 15-20, 1980.
- [25] K. Jemielniak « Some aspects of acoustic emission signal pre-processing », *J Mat Proc Tech* Vol. 109, pp. 242-247, 2001.