



**HAL**  
open science

## Optimisation des réservoirs composites de stockage hyperbare de l'hydrogène : bilan du projet Osirhys IV

Damien Halm, B. Magneville, Jacques Renard, Philippe Saffré, Stéphane Villalonga

### ► To cite this version:

Damien Halm, B. Magneville, Jacques Renard, Philippe Saffré, Stéphane Villalonga. Optimisation des réservoirs composites de stockage hyperbare de l'hydrogène : bilan du projet Osirhys IV. 22ème Congrès Français de Mécanique, Aug 2015, Lyon, France. hal-01675006

**HAL Id: hal-01675006**

**<https://hal.univ-smb.fr/hal-01675006>**

Submitted on 28 Oct 2018

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Optimisation des réservoirs composites de stockage hyperbare de l'hydrogène : bilan du projet Osirhys IV

**D. HALM<sup>1</sup>, B. MAGNEVILLE<sup>2</sup>, J. RENARD<sup>3</sup>, P. SAFFRÉ<sup>4</sup>, S. VILLALONGA<sup>5</sup>**

<sup>1</sup>Institut P' (UPR CNRS 3346) – ENSMA/Université de Poitiers/CNRS – 1, avenue Clément Ader – BP 40109 – 86961 Futuroscope Cedex

<sup>2</sup>LMS Samtech, 12 Rue de Caulet, 31300 Toulouse

<sup>3</sup>Centre des matériaux, Ecole des Mines de Paris, UMR CNRS 7633, BP 87, 91003 Evry

<sup>4</sup>Université Savoie Mont Blanc, Laboratoire SYMME, BP 80439, 74944 Annecy-le-Vieux Cedex

<sup>5</sup>CEA, DAM, Le Ripault, 37260 Monts, France

## Résumé :

*La minimisation du coût d'un réservoir à hydrogène embarqué dans un véhicule à pile à combustible requiert de réduire sa masse en composite à fibre de carbone tout en maintenant un haut niveau de sécurité. Dans cette perspective, le projet ANR Osirhys IV a développé une méthodologie d'optimisation dédiée, reposant sur une modélisation fine des mécanismes d'endommagement préalablement validée par comparaison avec les résultats d'essais menés sur échantillons et structures bobinés. Cette démarche a permis d'aboutir à une estimation de la pression moyenne d'éclatement ne s'éloignant pas de plus de 2% du résultat expérimental et une proposition de réduction de la masse de 40% et du coût de 15% à 30%.*

## Abstract :

*The minimization of the cost of an on-board hydrogen tank in a fuel cell vehicle requires the mass reduction of the carbon fiber composite while keeping a high safety level. To this end, the Osirhys IV ANR project has developed a specific optimization methodology, based on an accurate modelling of damage mechanisms, first validated by comparison with experimental results obtained on wound samples and structures. This approach leads to forecast the mean burst pressure with an error less than 2% and to propose a design with a mass decrease of about 40% and a cost reduction ranging from 15% to 30%.*

**Mots clefs : réservoir composite hyperbare, optimisation, éclatement**

# 1 Introduction

Une des utilisations des composites à fibre longue, en plein essor depuis plusieurs années, est la fabrication des structures cylindriques (dont les réservoirs). La fabrication de ces structures de révolution est faite par bobinage de fibres (pré – imprégnées, voie humide, fibres sèches...) sur un moule ou un mandrin [1]. Cette procédure est qualifiée d'enroulement filamentaire. Ce processus entraîne une architecture finale du matériau différente des stratifiés utilisés dans l'aérospatiale. Cette architecture particulière a des conséquences sur le comportement mécanique du matériau, notamment sur les modes et la cinétique de dégradation.

Une des applications de ces structures bobinées est le stockage de gaz à haute pression. Plus particulièrement, on peut concevoir des réservoirs pour le stockage de l'hydrogène à très haute pression à destination des voitures équipées de piles à combustible (Figure 1, Figure 2), en réponse aux problématiques énergétiques, climatiques et sanitaires [2].



Figure 1: Premier véhicule à pile à combustible hydrogène de série : Toyota Mirai (en vente depuis le 15 décembre 2014)

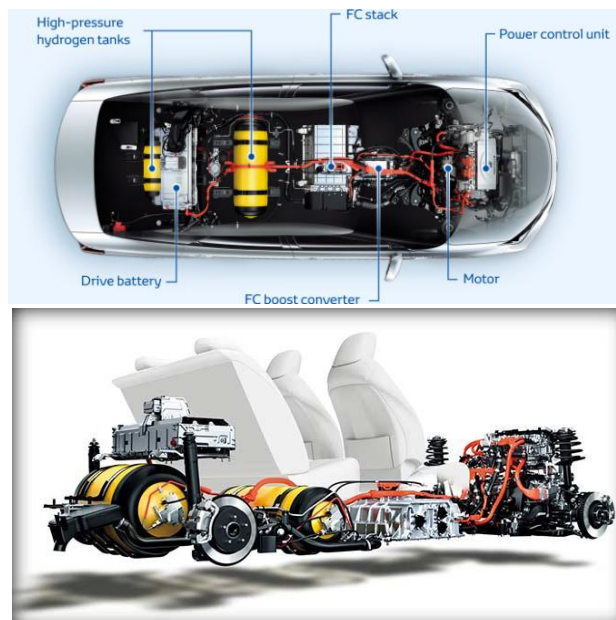


Figure 2 : Implantation des réservoirs 700 bar dans la Toyota Mirai

Pour structurer les réservoirs à des pressions élevées (en tenant compte des facteurs de sécurité : 2,25 pour la fibre de carbone) sans obtenir des masses de système de stockage trop importantes, des matériaux composites hautes performances sont utilisés. Alors que les structures composites minces représentent une très grosse majorité des cas, les pressions mises en jeu dans les stockages d'hydrogène conduisent à de fortes épaisseurs (entre 10 et 30 mm). Les connaissances associées au dimensionnement et à la conception de structures épaisses sont limitées alors que, de fait, celles-ci sont nettement plus sensibles aux variabilités de procédés et/ou de matériaux. Pour y faire face, les industriels accroissent les quantités de fibres de carbone déposées sur les réservoirs au détriment du prix et de la masse du réservoir. Cela constitue un véritable problème car la fibre de carbone représente déjà 45% à 80% du coût du réservoir selon la fibre de carbone utilisée (Figure 3)[3], la taille du réservoir ou le volume de production. Le prix demeure un des verrous majeurs de cette technologie inhibant son déploiement.

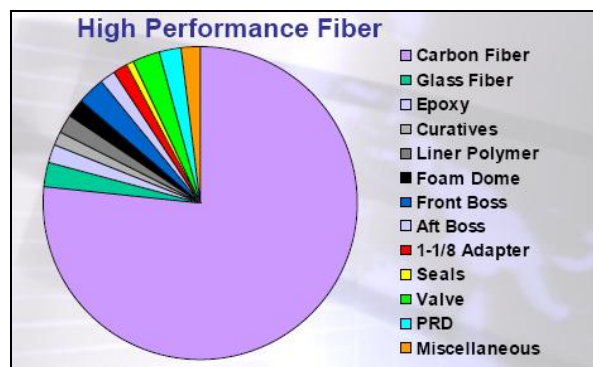


Figure 3 : Répartition des coûts pour un réservoir de type IV pour le stockage 700 bar de l'hydrogène gazeux [3]

Le projet ANR OSIRHYS IV tente d'apporter des réponses à ces verrous scientifiques. Il se penche sur le stockage haute pression de l'hydrogène pour des réservoirs de type IV où le liner, assurant uniquement la fonction d'étanchéité à l'hydrogène, est en matériau polymère et la fonction de résistance mécanique est prise en charge par la coque composite (très épaisse). L'objet de ce projet est de faire un état des lieux des codes de calculs EF pour le design et la simulation du comportement des réservoirs de stockage hyperbare, de valider et qualifier les codes de calcul utilisés [4], d'optimiser le coût final des réservoirs [5] et de proposer des méthodologies de dimensionnement.

Le projet OSIRHYS IV regroupe 5 partenaires académiques et industriels : le CEA, acteur majeur dans le développement de matériaux et procédés pour le stockage gazeux comprimé de l'hydrogène, Mines Paristech et ENSMA-P' spécialisés dans le dimensionnement, la caractérisation mécanique et la durabilité des matériaux composites, SYMME USMB expert dans le domaine de l'optimisation des structures et Samtech, éditeur de logiciels éléments finis (sous-traitant du CEA pour le projet).

Après avoir exposé la définition des structures étudiées, on présentera les essais réalisés tant sur structures élémentaires (échantillons représentatifs du matériau bobiné) que sur réservoirs. Différents modèles d'endommagement sont comparés dans le but de prévoir le plus précisément possible les pressions d'éclatement et les modes de rupture associés. Enfin, des méthodes d'optimisation sont développées afin de réduire la masse de composite tout en maintenant les performances du stockage.

## 2 Réservoirs bobinés : cahier des charges et définition

Le réservoir de référence (Figure 4) a été obtenu, en début de projet, à partir d'une optimisation expérimentale du réservoir 2L haute pression du projet ANR Hybou (dont la masse de composite est de 2300 g). Le réservoir d'étude est de type IV avec un liner thermoplastique et une coque composite en fibre de carbone et matrice epoxy élaborée par enroulement filamentaire. Sa masse de composite de 1 750 g. La longueur hors tout est de 320 mm avec un diamètre externe de 138 mm. L'épaisseur de composite est de 11 mm.



Figure 4 : Réservoir d'étude du projet ANR Osirhys IV

Des essais d'éclatement ont été réalisés en accord avec la réglementation européenne 406-2010 [6]. Les réservoirs ont été instrumentés en mesure de pression, de déformation en surface par jauges extensométriques et en volume (fibres optiques), d'allongement axial et gonflement radial (LVDT). L'éclatement a également été filmé par caméra rapide et des mesures de champ en surface ont été réalisées. Afin de caractériser la chronologie et la localisation des mécanismes de dégradation, des capteurs ont enregistré l'émission acoustique au cours du processus de mise en pression.

Parallèlement aux essais sur réservoirs, des éprouvettes parallélépipédiques droites (pour l'identification des propriétés du matériau) et entaillées (pour valider les modèles d'endommagement en présence de forts gradients de contraintes) ont été fabriquées par la procédure d'enroulement filamentaire en bobinant un mandrin puis en coupant le tube le long de l'axe pour pouvoir mettre à plat le cylindre de matériau composite bobiné. On assemble enfin les différentes orientations. La cuisson permet d'obtenir une plaque de matériau composite bobiné avec le drapage souhaité.

## 3 Simulation des essais sur échantillons et d'éclatement sur réservoirs

L'identification des paramètres du matériau composite s'est dans un premier temps basée sur les essais de traction réalisés sur éprouvettes droites. Cette identification a été par la suite améliorée par les mesures du taux volumique de fibres (pyrolyse, analyse d'images...) sur éprouvettes et réservoirs et par des essais de traction sur fibre unique.

Les lois de dégradation du composite implémentées par les partenaires ont été comparées. Différentes lois ont été utilisées (continues [7,8], de type Progressive Failure Analysis [9] ou probabilistes [10]), et

certaines partenaires ont modélisé le délaminage. Des simulations probabilistes ont été réalisées sur les modèles de réservoir et de structures simples. La vision probabiliste a l'avantage d'être plus réaliste car elle prend en compte dans le calcul la variabilité des propriétés du matériau.

Les lois matériaux ont été validées grâce aux simulations réalisées sur échantillons entaillés. Les résultats des essais montrent une très bonne estimation à l'échelle macroscopique, mais aussi une bonne reproduction des phénomènes de rupture microscopiques.

Les différents modèles de simulation d'éclatement du réservoir utilisés par les partenaires ont été comparés, dans des contextes 2D, 3D ou axisymétriques, avec différents codes (Abaqus, Ansys, Samcef, Zebulon), dans des versions déterministes ou probabilistes.

Les résultats généraux des calculs non linéaires sont les suivants :

- Les plis circonférentiels internes sont les premiers à rompre, menant à un mode d'éclatement par ouverture le long d'une génératrice du cylindre.
- Une valeur approchée de la pression d'éclatement (à 2% près) et un mode d'éclatement conforme à l'expérience sont retrouvés par le calcul,
- La fissuration matricielle est importante et précoce mais non destructive,
- On n'observe pas de délaminage destructif avant l'éclatement.

Des post-traitements ont été effectués pour comparer les simulations aux mesures sur le réservoir lors des essais. On note :

- Une très bonne prédiction du comportement global du réservoir (allongement axial et gonflement radial mesuré sur les 2 jauges LVDT),
- Une bonne estimation des déformations dans toute l'épaisseur du composite par comparaison des mesures par fibres optiques aux résultats de calcul,
- Une bonne estimation de l'apparition des événements acoustiques et des non-linéarités radiales à partir de 1500 bar grâce aux modèles probabilistes (ruptures de fibres faibles).

## 4 Optimisation du poids des réservoirs

L'utilisation des réservoirs de stockage d'hydrogène dans le domaine de l'automobile oblige les concepteurs à minimiser son coût. La fibre de carbone constituant au moins la moitié du prix du réservoir, l'optimisation consiste à réduire la masse de composite tout en gardant les performances à l'éclatement [11-13].

A iso-procédés et iso-matériaux, les paramètres d'optimisation retenus dans le cadre de cette étude sont :

- le nombre total de plis
- le séquençage, c'est à dire l'alternance et le nombre de couches hélicoïdales et circonférentielles
- les angles d'enroulement

Les caractéristiques matériaux, paramètres essentiels dans une optimisation structurelle composite, sont figées dans cette étude. L'objectif de l'optimisation étant la masse du réservoir, les contraintes fixées dans cette étude, sont :

- une pression minimale d'éclatement
- la localisation de la rupture finale (en partie cylindrique)

Différentes stratégies avec plusieurs méthodes d'optimisation ont été mises en œuvre sur ce problème. Elles ont permis de statuer sur l'intérêt de considérer ou non l'endommagement sur la rapidité et la justesse du processus d'optimisation.

Des méthodologies d'optimisation ont ainsi été testées, soit directement sur les modèles éléments finis, sans considération de l'endommagement, ou indirectement, sur des méta-modèles avec considération de l'endommagement.

Les algorithmes utilisés sur les modèles éléments finis peuvent être de type génétique, couvrant ainsi l'intégralité du domaine d'optimisation aux dépens d'un nombre d'analyses structurelles élevé, mais aussi mathématique tel que l'algorithme GCM (Globally Convergent Method), qui permet de converger rapidement vers un optimum à partir d'une configuration de référence. Cette méthode est particulièrement adaptée aux problèmes dont la fonction objectif et les contraintes varient de manière quasi-monotone en fonction des variables de conception.

Un algorithme génétique a également été utilisé sur des méta-modèles développés dans le cadre de ce projet. Ces méta-modèles sont issus de plans d'expérience et de méthodes de krigeage, et substituent à la représentation par éléments finis des modèles de moindre fidélité mais plus maniables, avec considération de l'endommagement. En revanche, ces méthodes nécessitent des validations supplémentaires des modèles.

Les principales avancées du projet sont les suivantes :

- Optimisation structurelle sur une structure complexe et complète.
- Prise en compte du comportement non linéaire du composite (endommagement) dans la méthode d'optimisation.
- Développement d'une méthode d'optimisation spécifique permettant d'obtenir un ratio performance/coût très intéressant.
- Diminution de la masse de composite du réservoir 2L de 40%
- Diminution très sensible (de 15% à 30%) du coût d'un réservoir

Ce projet permet de tirer plusieurs enseignements :

- L'optimisation sur le réservoir complet est nécessaire pour tenir compte du mode de rupture.
- La non-géodésie a relativement peu d'impact sur la pression de rupture mais a une forte influence sur la masse.
- Les résultats ont montré que la considération de l'endommagement dans le processus d'optimisation n'était pas indispensable pour la géométrie étudiée, sous respect d'un type d'éclatement en virole du réservoir.

## 5 Bilan du projet

Les simulations avec modèles probabilistes ont montré qu'il est nécessaire de prendre en compte la variabilité des propriétés mécaniques du matériau (en particulier de la contrainte à rupture des fibres) si on souhaite reproduire au plus proche la pression d'éclatement du réservoir.

Il est nécessaire de simuler l'ensemble des mécanismes d'endommagement si on souhaite prévoir le mode de rupture effectif et la pression d'éclatement dont la valeur simulée peut s'approcher de la valeur expérimentale à moins de 2%.

L'estimation rigoureuse des mécanismes d'endommagement et l'application de méthodes d'optimisation dédiées et automatisées ont permis de proposer un réservoir dont la masse a été diminuée de 40% (de 2300 g à 1400 g) par rapport au réservoir du projet ANR Hybou et le coût de 15% à 30%.

En perspective, un outil métier doit être réalisé sur la base d'une maquette développée durant le projet ANR Osirhys IV. Il permettra d'intégrer toute la connaissance du projet pour le dimensionnement

d'un réservoir composite et de donner la capacité à un non spécialiste de dimensionner puis optimiser la structure composite d'un réservoir. Cet outil, une fois finalisé, pourrait être proposé à des bureaux d'études, des fabricants de réservoirs mais également à des intégrateurs ou des utilisateurs de réservoirs. Il est également envisagé des extrapolations à des réservoirs de capacité supérieure (37L, 105L, 150L).

Dans le cadre du projet Européen Copernic, la masse de composite d'un réservoir de 37L a été optimisée numériquement et un gain de 20% a été obtenu grâce à l'approche numérique développée dans le projet ANR Osirhys IV. La masse du composite du réservoir 37L a été réduite de 27 kg à 21 kg avec une pression d'éclatement supérieure à 1800 bar.

## Remerciements

Ce travail a été financé par l'Agence Nationale pour la Recherche (ANR) à travers le projet Hydrogène et Piles à Combustible (Projet OSIRHYS IV, N° ANR-09-HPAC-010).

## Références

- [1] Peters, S.T., Composite Filament Winding, ASM International, ISBN 978-1-61503-852-7, 2011
- [2] A National Vision of America's Transition to a Hydrogen Economy – To 2030 and Beyond, February 2002, United States Department of Energy, 2002
- [3] Mark J. Warner, Low Cost, High Efficiency, High Pressure Hydrogen Storage, DOE Review, Quantum Technologies Inc., 2005
- [4] Soden PD, Hinton MJ, Kaddour AS. A comparison of the predictive capabilities of current failure theories for composite laminates. *Composite Science and Technology* 1998, 58:1225 – 1254.
- [5] Ahluwalia R.K., Hua T.Q., Peng J-K, Roh, H.S., System Level Analysis of Hydrogen Storage Options, DOE Hydrogen and Fuel Cells Program Review, Arlington, 2013
- [6] Règlement (UE) n° 406/2010 de la commission du 26 avril 2010, Journal officiel de l'Union Européenne, L 122/1, 2010
- [7] Berro Ramirez J.P., Halm D., Grandidier J.C., Villalonga S. 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*, 2014, accepté.
- [8] Ladevèze P., LeDantec E., Damage modeling of the elementary ply for laminated composites, *Comp. Science Tech.* 1992, 43:257-267
- [9] Padhi G.S., Sheno R.A., Moy S.S.J., Hawkins G.L., Progressive failure and ultimate collapse of laminated composite plates in bending. *Composite Structures* 1997, 40:277 – 291
- [10] Patamaphom B., Endommagement des matériaux composites pour réservoirs d'hydrogène, PhD Mines ParisTech, 2014.
- [11] Roh, H. S.; Hua, T. Q.; Ahluwalia, R. K., Optimization of carbon fiber usage in Type 4 hydrogen storage tanks for fuel cell automobiles, *Int. J. Hydrogen Energy* 2013, 38:12795-12802
- [12] Leh, D.; Saffre, P.; Francescato, P., Arrieux, R. Multi-sequence dome lay-up simulations for hydrogen hyper-bar composite pressure vessels, *Comp. Part A* 2013, 52:106-117
- [13] Lin, DTW, Hsieh, JC, Chindakham, N, Hai, PD, Optimal design of a composite laminate hydrogen storage vessel, *Int. J. Energy Research* 2013, 37:761-768