



# OSIRHYS IV - Qualification des codes pour la prédiction du comportement mécanique des structures composites des réservoirs embarqués de stockage à 700 bars de l'hydrogène

Maxime Bertin, Martin Kempeneers, David Leh, Pongsak Nimdum, Juan Pedro Berro Ramirez, Stéphane Villalonga

## ► To cite this version:

Maxime Bertin, Martin Kempeneers, David Leh, Pongsak Nimdum, Juan Pedro Berro Ramirez, et al.. OSIRHYS IV - Qualification des codes pour la prédiction du comportement mécanique des structures composites des réservoirs embarqués de stockage à 700 bars de l'hydrogène. AMAC. 17èmes Journées Nationales sur les Composites (JNC17), Jun 2011, Poitiers-Futuroscope, France. pp.137, 2011. <hal-00598114>

**HAL Id: hal-00598114**

**<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00598114>**

Submitted on 4 Jun 2011

**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.



# **OSIRHYS IV – Qualification des codes pour la prédiction du comportement mécanique des structures composites des réservoirs embarqués de stockage à 700 bars de l’hydrogène**

## ***OSIRHYS IV, Code Qualification for 700 bar On-board Composite Pressure Vessel Mechanical Behaviour Prediction***

**Maxime Bertin<sup>1</sup>, Martin Kempeneers<sup>2</sup>, David Leh<sup>3</sup>, Pongsak Nimdum<sup>4</sup>, Juan Pedro Berro Ramirez<sup>5</sup> et Stéphane Villalonga<sup>1</sup>**

1 : CEA, DAM, LE RIPALULT  
F-37260 Monts, France  
e-mail : maxime.bertin@cea.fr  
stephane.villalonga@cea.fr,

2 : SAMTECH France  
Centre Aéroparc / ZA ST Martin du Touch, 12,  
rue Caulet, Bât A14 F-31300 Toulouse, France  
e-mail : martin.kempeneers@samtech.com

3 : SYMME Polytech' Annecy-Chambéry  
BP 80439, F-74944 Annecy Le Vieux, France  
e-mail : david.leh@univ-savoie.fr

4 : Centre des matériaux Ecole Nationale Supérieure Mines ParisTech  
BP 87- F-91003 Evry, France  
e-mail : nimdum@mat.ensmp.fr

5 : ENSMA – Institut P'  
BP 40109, F-86961 Futuroscope-Chasseneuil France  
e-mail : juan-pedro.berro-ramirez@ensma.fr

### **Résumé**

Le stockage de l'hydrogène reste un point clé pour le déploiement à grande échelle des applications piles à combustible. Pour le moment, le stockage d'hydrogène gazeux à haute pression dans des réservoirs de type IV reste la meilleure technologie. Mais il est nécessaire d'atteindre une réduction significative des coûts de ces systèmes de stockage. Une optimisation de la structure composite par des simulations numériques est nécessaire. Le but du projet OSIRHYS IV est de développer et valider des méthodes et modèles pour l'optimisation et le design de réservoir haute pression avec connaissance de niveaux d'incertitudes. Les premières simulations d'éclatement ont été effectuées et les résultats de calculs en statique linéaire ont été comparés aux données expérimentales. Les comparaisons portent sur les masses des composants, la pression et le mode d'éclatement et des déplacements locaux. Les résultats montrent que l'analyse en statique linéaire utilisant des modèles 3D et axisymétriques peut déjà prédire avec une précision raisonnable le comportement radial du réservoir dans le cas d'un éclatement sain. Néanmoins, l'amélioration des modèles est nécessaire pour atteindre de meilleures performances. Cela passe par la connaissance des matériaux, de la géométrie du réservoir et des lois de comportements.

### **Abstract**

The hydrogen storage stays a key issue for the high scale deployment of fuel cell applications. The gaseous hydrogen storage at high pressure with type IV vessels is the best technology nowadays. But it is necessary to reach a significant cost reduction of these storage systems. An optimization of the composite structure which can be reached thanks to numerical simulation is needed. The goal of the OSIRHYS IV project is to develop and validate models and methods for composite high pressure design and optimization with behavior uncertainties knowledge. It was decided to limit this study to a particular topology, material and winding process. First burst simulations have been performed and results of linear static computations have been compared to experimental data. Comparisons are about vessel component masses, burst pressure, burst mode and local displacements. Results show that linear static analyses using axisymmetric and volume FE models could already predict with a reasonable accuracy the radial behavior of the tank in the case of a safe burst mode. Nevertheless, improvements of partner models are needed to reach better performances. It will be about material and vessel geometry knowledge, behavior modeling and FE model.

**Mots Clés :** Réservoir haute pression de type IV, Simulation numérique, Comparaison expérimental/calcul numérique.

**Keywords :** Type IV high pressure vessel, Numerical simulation, Experimental/numerical comparison.

## **1. Introduction**

L'hydrogène est une alternative aux énergies traditionnelles que sont le pétrole et le gaz naturel. Il offre des avantages comme l'absence d'émission de gaz à effet de serre. Depuis plus de dix ans, cette voie a fait l'objet de recherches et de développements. Le stockage de l'hydrogène reste une étape clé dans le déploiement à grande échelle des applications piles à combustible. Différentes

voies existent pour le stockage de l'hydrogène comme le stockage par absorption dans un solide, le stockage sous forme liquide, le stockage dans des mousses polymères et composites, le stockage sous forme d'hydrure et le stockage gazeux à haute pression. Aujourd'hui, les réservoirs de gaz sous pression représentent la voie la plus mature pour le stockage de l'hydrogène. Pour être efficace, ce type de stockage doit être effectué à haute pression (à partir de 350 bars et jusqu'à 700 bars pour les applications embarquées). Il existe quatre types de réservoirs sous pression. De nos jours, le stockage d'hydrogène gazeux à haute pression dans des réservoirs de type IV (réservoirs à coque composite, liner polymère) est la meilleure technologie. Les récents développements sur des réservoirs de type IV à 700 bars ont montré des résultats très prometteurs (haute résistance au cyclage, pression d'éclatement, étanchéité à l'hydrogène, capacité massique et volumique de stockage,...)

Pour atteindre un développement commercial, cette technologie nécessite des phases de recherche et développement pour réduire les coûts et améliorer les performances, la fiabilité et la durabilité des réservoirs haute pression actuels. La coque composite permet de supporter des contraintes mécaniques élevées due à la pression interne. L'utilisation massive du composite fait que le coût de la fibre de carbone représente 50% à 70% du coût final du réservoir. Une optimisation de la coque composite permettra d'atteindre des réductions de coûts significatives pour les réservoirs à haute pression. Une amélioration des simulations numériques est nécessaire parce qu'aujourd'hui, la plupart des ingénieurs travaillent avec des modèles simplifiés, généralement éloignés des comportements mécaniques réels.

OSIRHYS IV est un projet financé par l'Agence Nationale française pour la Recherche (ANR) à travers le programme Hydrogène et Piles A Combustible (programme HPAC) et qui réunit le CEA, ARMINES, CEA-SAMTECH, l'Institut P' et SYMME. L'objet de ce projet est de clarifier les incertitudes et les approximations dans le calcul et le design des réservoirs composites haute pression afin d'obtenir des critères et des modèles sûrs et adaptés pour cette application. Le projet est dédié à toute la chaîne de conception et de simulation. Il vise à améliorer la caractérisation des matériaux et du procédé (enroulement filamentaire) et à établir une importante base de données partagée entre tous les partenaires du projet. Le but du projet OSIRHYS IV est de développer et valider des modèles et des méthodes pour l'optimisation et le design avec une connaissance des incertitudes sur le comportement des réservoirs (Fig. 1.).

Tout d'abord, ce papier présentera les restrictions pour ce projet et les limitations actuelles des simulations sur les réservoirs composites à haute pression. Ensuite, les premiers résultats des partenaires du projet seront détaillés. Cette partie correspond à la première étape de la simulation d'éclatement et à une comparaison avec un essai d'éclatement expérimental. Enfin, les travaux futurs seront présentés.

## **2. Limitation du calcul et du design**

### **2.1 Restriction du design**

Face à l'étendue des possibilités du design du type de réservoir sous pression envisagé (matériaux, topologie, procédé de fabrication, angles d'enroulement,...), il a été décidé de limiter cette étude à une topologie, des matériaux et un procédé de fabrication (enroulement filamentaire) particuliers. Dans tous les cas, le réservoir sous pression sera optimisé pour contenir le maximum d'hydrogène dans un volume limité pour les meilleurs coûts de fabrication, de capacité de résistance à la charge et de durée de vie. Toutefois, le but de cette approche est d'améliorer les connaissances, d'avoir une meilleure compréhension du comportement de ce type de réservoir sous pression afin d'en déduire des règles de design et des techniques d'optimisation efficaces en accord avec le procédé de fabrication. Cette première étape est vitale avant d'élargir la liste des paramètres de design pour finalement répondre aux enjeux industriels et économiques.

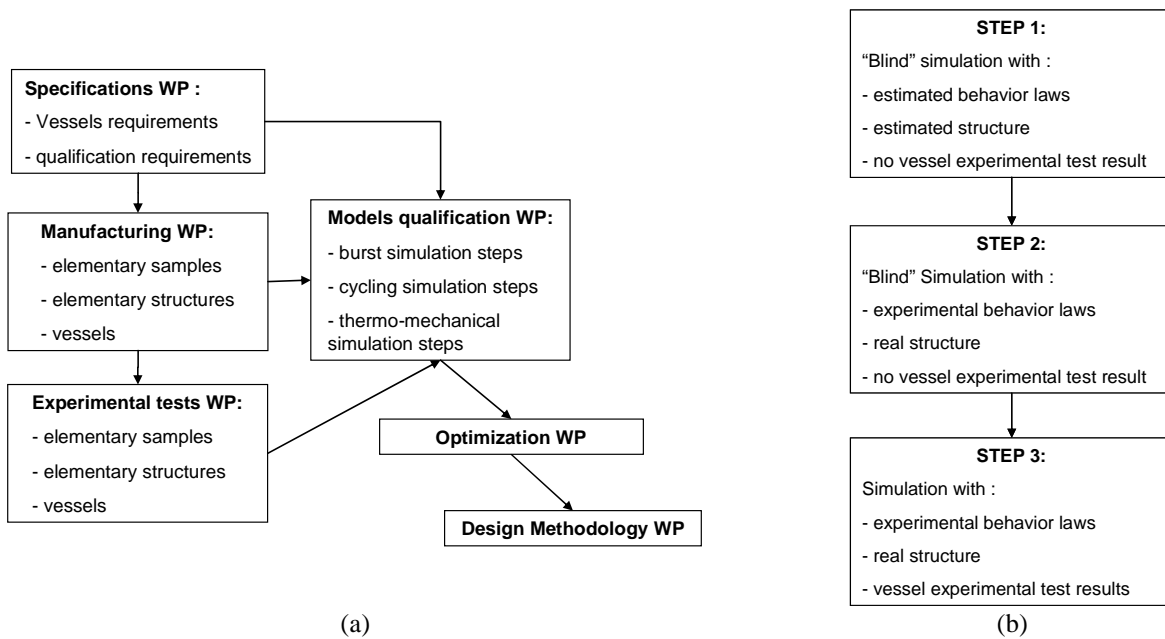


Fig. 1. Projet OSIRHYS IV : (a) Tâches du projet et (b) étapes de qualification des codes.

## 2.2 Limitations de la simulation

Les limitations actuelles des simulations sont dues aux différents modèles et aux incertitudes sur les comportements. Par exemple, les aspects suivants peuvent être cités :

- Le design de l'empilement composite en fonction de la stratégie de bobinage dans les dômes (Fig. 2.a) du réservoir (évolution des épaisseurs [1-3], évolution des angles avec une trajectoire d'enroulement géodésique basée sur les équations de Clairaut ou avec des techniques d'enroulement non géodésique [4], superposition de stratifiés, paramètres de glissement).

- Le choix du type d'éléments du modèle EF. Les éléments de coques sont surtout appropriés pour l'analyse de structures d'épaisseur faible à modérée. Les éléments 3D sont, eux, plus appropriés pour les calculs de précision en dépit de leur utilisation laborieuse pour les procédures de maillage d'enroulement qui peuvent apparaître comme consommatrice de temps dans une phase d'optimisation où la modification de l'empilement composite est prédominante. Une autre limitation concerne la difficulté des modèles axisymétriques à caractériser fidèlement le comportement périodique cyclique du composite.

- Le modèle d'endommagement. Une procédure d'optimisation devra prendre en compte tous les phénomènes d'endommagement (fatigue, rupture,...) rencontrés dans la structure. Le comportement en fatigue des matériaux composites dépend de la nature des constituants, du procédé, de l'application et de la température de fonctionnement..

- De nombreux modèles d'endommagement pour les structures composites sont disponibles. Par exemple, les plus sophistiqués sont basés sur des micro-modèles [5] mais sont limités par leur complexité et leur coût sur des structures relativement basiques. De plus, des macro-modèles [6], certainement plus appropriés pour des structures plus grandes et plus complexes, existent mais sont encore à tester sur des réservoirs sous pression.

- Les procédures d'optimisation. L'utilisation de techniques d'optimisation automatisées prenant en compte simultanément tous les paramètres de l'empilement (différents angles et épaisseurs de bobinage, paramètres de glissement, nombre de plis) avec des modèles de fatigue et d'endommagement n'existent pas aujourd'hui pour ce type de structure. Les études les plus ambitieuses se limitent à l'optimisation d'une partie d'un réservoir ou à l'optimisation d'un angle d'enroulement sans tenir compte du comportement en fatigue pour l'optimisation globale [7]. Différentes procédures d'optimisation pourront être étudiées [8].

### 3. Résultats des simulations d'éclatement.

Le réservoir composite considéré dans le projet OSIRHYS IV se compose des trois parties suivantes : le liner interne en polymère qui assure l'étanchéité à l'hydrogène du réservoir (il n'a pas un rôle structural pour le réservoir), les embases métalliques qui assurent la connexion du réservoir avec les autres composants du système dans lequel il est inséré et la coque composite externe qui assure l'intégrité de la structure du réservoir sous pression.

Les dimensions principales du réservoir sont : un volume de 2 L, un diamètre externe d'environ 130 mm, une longueur totale d'environ 300 mm, une épaisseur composite d'environ 11 mm.

Les premières simulations qui ont été effectuées dans le cadre du projet porte sur un essai d'éclatement du réservoir. Ce test normalisé consiste en une augmentation monotone de la pression interne du réservoir jusqu'à éclatement de la structure. Le réservoir est fixé d'un côté et l'autre côté reste totalement libre. Le principe de l'essai est présenté sur la Fig. 2.a.

Pendant l'essai, il y a deux manières pour le réservoir composite d'éclater (Fig. 2.b) : un mode sain (expulsion des embases métalliques vers l'intérieur) et un mode non sain (expulsion des embases métalliques vers l'extérieur). Pour ce type d'essai, le projet OSIRHYS IV vise d'un côté à développer des procédés afin d'obtenir de meilleures prédictions numériques des charges à l'éclatement de réservoirs composites donnés et aussi d'obtenir une meilleure compréhension des phénomènes activant l'un ou l'autre des modes d'éclatement.

Les résultats de simulations présentés ici correspondent à la première étape de modélisation (Fig. 1.b). Cette première étape considère une connaissance initiale sommaire des dimensions géométriques, des caractéristiques de la coque composite et des propriétés matériaux du réservoir. Le principal objectif de cette première étape est d'évaluer par la suite l'impact de ces incertitudes sur les résultats finaux.

Dans ce projet, tous les partenaires ne se focalisent pas sur les mêmes objectifs (certains développent des lois d'endommagement spécifiques, d'autres travaillent sur la modélisation du composite dans les dômes,...). Par conséquent, la comparaison des résultats pour cette première simulation de test d'éclatement se limite aux résultats communs disponibles pour le tout début du projet ; ils sont pour le moment limités à des calculs en statique linéaire.

Cependant, ce papier présente également d'autres résultats préliminaires obtenus en utilisant des simulations ou des modèles plus complexes, qui ne sont pas encore communs à tous les partenaires, afin d'orienter la suite du projet OSIRHYS IV.

Les résultats de simulation sont comparés aux résultats d'un essai pour lequel le mode d'éclatement obtenu pour le réservoir est le mode sain.

#### 3.1 Comparaison des modèles EF

En partant de données initiales communes, chaque partenaire a mis en œuvre ses propres modèles EF du test. Cette partie présente brièvement les différents modèles EF qui ont été développés et utilisés (Tab. 1.). La Figure 3 donne une visualisation de ces modèles.

Le réservoir a été fabriqué en utilisant le procédé d'enroulement filamentaire ; les caractéristiques du composite (orientations et épaisseurs des couches) dans les dômes ne sont pas précisément mesurées et sont donc évaluées par l'utilisation de différentes méthodes. Tous les partenaires n'ont pas utilisé la même méthode : pour certains, le plugin Wound Composite d'ABAQUS a été utilisé, pour d'autres, des données ont été extraites par inspection des radiographies X du réservoir, ou même des caractéristiques très simplifiées des plis composites dans les dômes ont été utilisées (Tab. 1).

La diversité des modèles utilisés conduit à des différences des masses de composite comme montré sur la Figure 4a. Les modèles EF conduisent aux mêmes masses de composite dans la partie cylindrique du réservoir. Cette valeur correspond à la valeur exacte théorique qui peut être facilement calculée à partir des données du composite et des dimensions du réservoir. La divergence sur la masse totale de composite dans le réservoir des différents modèles EF provient principalement de la méthode utilisée pour modéliser le composite dans les dômes du réservoir. Par

exemple, deux partenaires utilisent le même outil pour modéliser les dômes et obtiennent des résultats très similaires pour la masse même si les modèles EF utilisés sont différents.

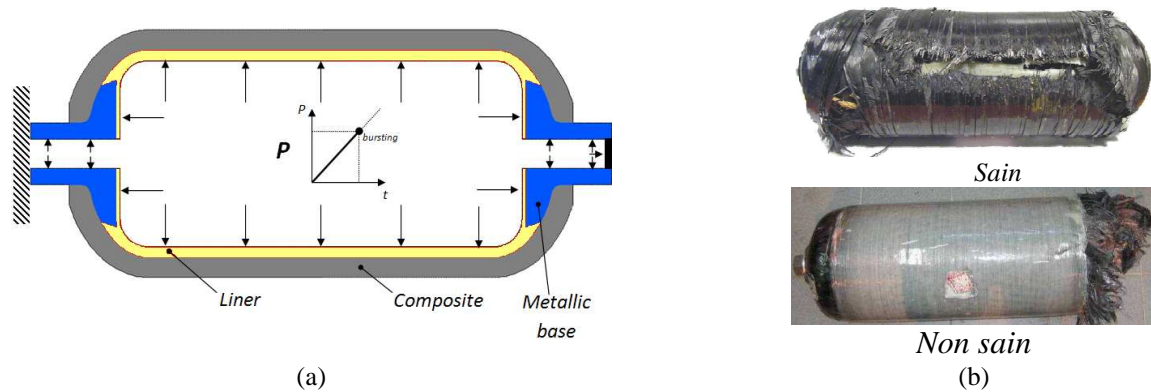


Fig. 2. Test d'éclatement : (a) principe et (b) modes d'éclatement

Partenaire	Hypothèses du modèle EF	Code de calcul	Technique de modélisation des dômes	Nombre de degrés de liberté
ARMINES (Fig. 3a)	3D	ZEBULON	Inspection radiographique	$1,10 \times 10^6$
CEA (Fig. 3b)	3D+ Symétrie	ABAQUS	ABAQUS Wound Composite	$4,60 \times 10^5$
CEA-SAMTECH (Fig. 3c)	Axisymétrique	SAMCEF	Caractéristiques simplifiées	$4,63 \times 10^4$
INSTITUT P' (Fig. 3d)	Axisymétrique	ABAQUS	ABAQUS Wound Composite	$7,73 \times 10^4$
SYMME (Fig. 3e)	Non-Axisymétrique Mixte : coque et solide	ANSYS	Modèle personnel	$2,86 \times 10^4$

Tab. 1. Modèles éléments finis

La comparaison des masses des trois composants du réservoir avec les masses réelles du réservoir qui a été testé (Fig. 4.b) montre que la masse de composite est correctement évaluée pour les modèles 3D et axisymétriques alors que la masse du liner est légèrement supérieure. La contribution mécanique de cette partie à l'intégrité structurale du réservoir étant très limitée, cette différence a très peu d'influence sur les résultats des calculs. Ces résultats de masse valident, en termes de conformité géométrique, les modèles EF qui ont été créés. Le tableau 1 révèle une assez grande disparité au niveau des nombres de degrés de liberté entre les différents modèles EF. Cette diversité présente deux principaux avantages :

- possibilité de replis dans le cas où n'importe quelle raison rendrait un des modèles non valide.
- adéquation et pertinence des modèles avec les différents objectifs (modèles 3D plus adaptés à l'étude de l'endommagement, modèles axisymétriques et mixte plus adaptés à l'optimisation).

### 3.2 Comparaison des résultats de statique linéaire

Comme mentionné précédemment, cette partie se limite à des calculs en statique linéaire. Trois paramètres physiques sont comparés : deux déplacements locaux et la pression d'éclatement. Cette dernière a été calculée en considérant un critère très simple de rupture de fibre dans les plis du composite. Ce critère est systématiquement atteint sur la virole du réservoir pour la couche circonférentielle la plus interne. Les jauges de déplacement sont localisées comme montré sur la Figure 5. Les capteurs de déplacement ont été placés sur le réservoir pour le test d'éclatement. La Figure 6 montre respectivement les résultats obtenus pour le déplacement axial (Fig. 6.a) et le déplacement radial (Fig. 6.b) par les cinq partenaires ainsi que la comparaison de ces simulations aux résultats de l'essai. Pour chaque graphique tracé, le point final indique le niveau de pression à

l'éclatement obtenu en considérant le critère simple de rupture. Le dernier point de la courbe d'essai correspond à la pression d'éclatement du réservoir définie comme étant la pression maximale atteinte au cours de l'essai.

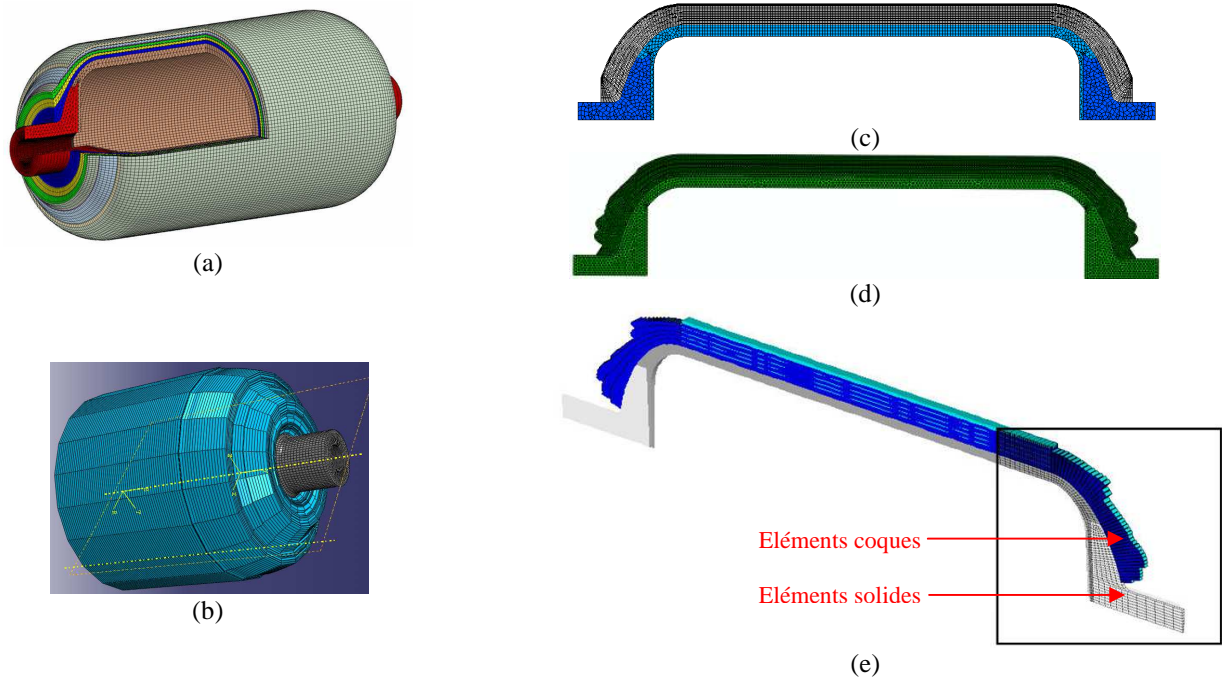


Fig. 3. Visualisation des modèles EF

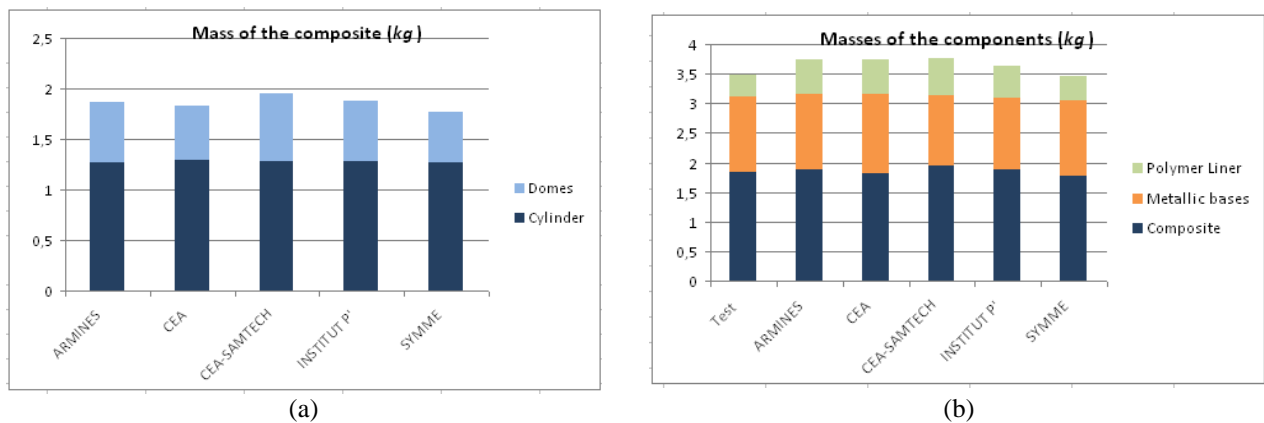


Fig. 4. Comparaison des masses (a) en composite des différents modèles et (b) des différents constituants du réservoir

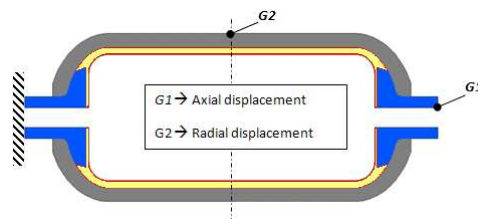


Fig. 5. Localisation des jauges de déplacement

Tout d'abord, il apparaît qu'aucune des simulations ne représente correctement le comportement axial du réservoir pendant l'essai. Deux phénomènes non linéaires semblent être à l'origine de ces différences. Tout d'abord, il y a un court mais important phénomène non linéaire qui apparaît au tout début de l'essai. On peut supposer que celui-ci peut être dû au rattrapage des jeux dans le montage expérimental. Le second phénomène non linéaire est plus faible et plus continu et semble



moins être dû aux imperfections du montage expérimental que le premier. Une attention particulière devra être portée à ce phénomène dans le futur.

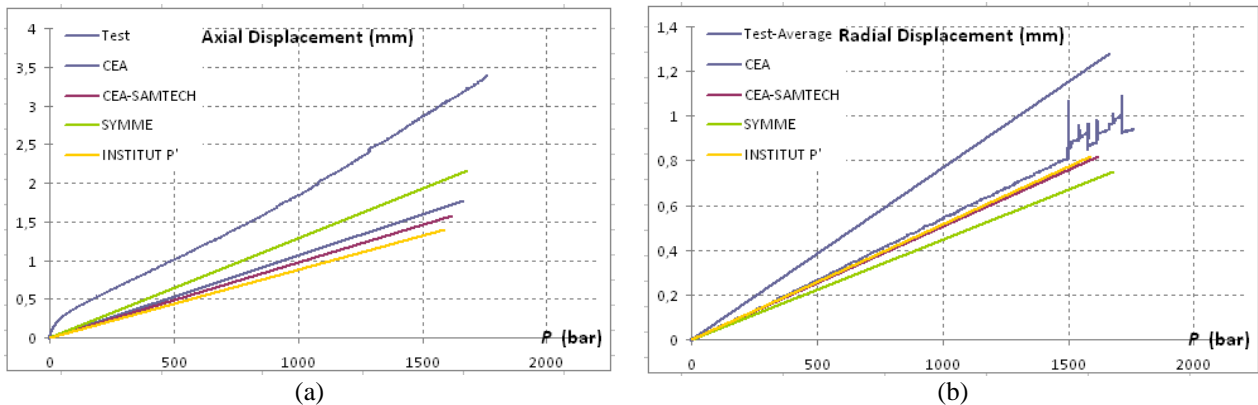


Fig. 6. Calcul en statique linéaire (a) du déplacement axial et (b) du déplacement radial.

Les résultats des différents partenaires sont très proches. Il semble donc que les modèles axisymétriques et 3D peuvent être utilisés indifféremment pour ce type d'analyse. Il semble que seul le coût des calculs, les considérations pratiques de modélisation ou des éventuelles conclusions futures liées à des simulations plus complexes (*i.e.* des propagations d'endommagement non axisymétriques) pourraient conduire au choix d'un de ces deux types de modèles EF.

Le déplacement radial de l'essai (Fig. 6.b) apparaît comme étant plus linéaire que le déplacement axial. Une conséquence directe est que la plupart des calculs en statique linéaire donne de bons résultats pour le déplacement radial du réservoir.

L'éclatement étant sain pour l'essai de référence considéré, il est naturellement fortement lié au chargement dans les couches circonférentielles de la partie centrale du cylindre du réservoir. Il est donc surtout lié aux efforts dans les fibres des couches circonférentielles. La comparaison des modèles EF et des résultats de l'essai semble confirmer cette hypothèse. En effet, dans les résultats du test de la Figure 6.b, des ruptures locales dans le composite semblent apparaître proches des pressions d'éclatements théoriques prédites par les analyses EF. Cependant, ces ruptures locales ne conduisent pas à l'éclatement global de la structure.

Les principales conclusions de ces comparaisons sont que ces analyses en statique linéaire utilisant des modèles 3D ou axisymétriques peuvent déjà prédire avec une précision raisonnable le comportement radial du réservoir dans le cas d'un éclatement sain, même si les données matériaux n'ont pas encore été déterminées expérimentalement. Cependant, le critère local simple utilisé dans ces analyses est probablement trop conservatif et pas complètement fiable pour prédire précisément la pression d'éclatement du réservoir. Des modélisations ou des analyses plus complexes sont donc requises afin d'atteindre ces objectifs.

### 3.3 Causes des incertitudes

Cette partie liste les causes d'incertitudes des premières simulations. On peut rappeler que les hypothèses sont les suivantes : tous les calculs ont été effectués avec la même géométrie de réservoir et les mêmes bases de données matériaux.

La même géométrie signifie la même longueur de réservoir, le même diamètre, la même géométrie de dôme en haut et en bas du réservoir. La même base de données matériaux signifie la même matrice de rigidité, comme tous les calculs ont été effectués dans le domaine linéaire.

Néanmoins, même en considérant ces données communes, il reste des différences qui peuvent conduire à des dispersions et des approximations différentes entre les résultats obtenus par les différents partenaires. On peut mentionner le nombre d'éléments du maillage du réservoir, la non-uniformité du maillage et le choix des zones les plus raffinées, le raffinement possible des zones les

plus contraintes, le type d'élément fini (éléments de coques, éléments axisymétriques, éléments 3D), le nombre de degrés de liberté des types d'éléments, les conditions aux limites...

D'autres causes peuvent être trouvées, indépendamment du traitement par EF, comme la manière d'analyser les photos décrivant localement l'interface entre le composite, le liner et les embases métalliques, les entrecroisements des différents plis dus au procédé d'enroulement filamentaire, le liner et ses connexions avec le composite et les embases métalliques ou encore l'orientation des fibres et l'épaisseur du composite dans les dômes du réservoir.

Le critère utilisé pour décrire la limite du domaine d'élasticité et la rupture peut causer des fluctuations dans les résultats et par la suite de la dispersion. De plus, certains partenaires n'ont pas considérés jusqu'à maintenant différentes manières de décrire le comportement du composite. Les lois de comportement (évolution de l'endommagement) et leur influence ne sont pas prises en compte dans le présent papier.

### 3.4 Vers des modélisations plus complexes

Certains partenaires ont développé des modèles EF plus complexes du réservoir afin d'essayer de surmonter les limites de cette première analyse.

La première étape vers des simulations plus complexes a été d'effectuer des calculs avec non linéarité géométrique en utilisant le même modèle. Cependant, même si ces calculs semblent légèrement améliorer les résultats des simulations vis-à-vis des résultats de l'essai (Fig. 7.), ces résultats restent très proches de ceux obtenus par les calculs en statique linéaire et ne permettent pas de se rapprocher de la non-linéarité observée sur la jauge de déplacement axiale de l'essai.

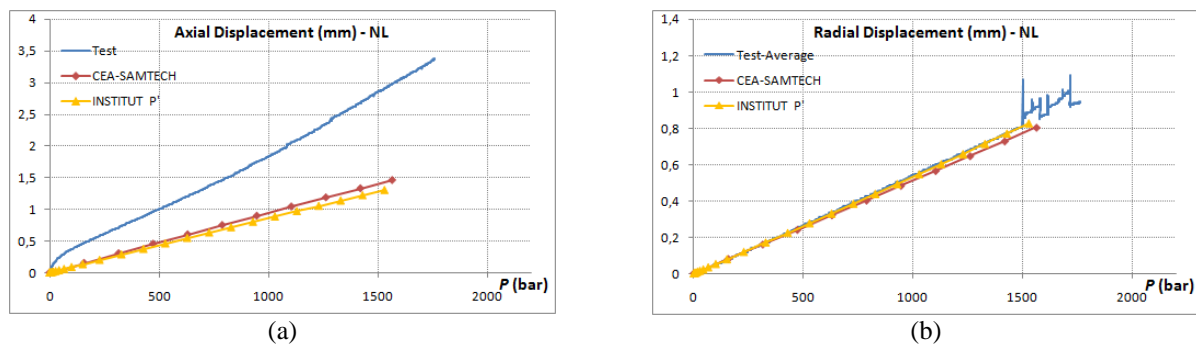


Fig. 7. Calcul en statique non linéaire (a) du déplacement axial et (b) du déplacement radial.

Une autre étape pour enrichir la simulation consiste à introduire des lois d'endommagement intralaminaires pour le composite dans le modèle EF. La loi qui a déjà été utilisée dans ce projet est la seule disponible dans SAMCEF v13.1 qui est une extension des travaux de Ladevèze et LeDantec [9] dans laquelle des variables d'endommagement associées aux fibres et aux directions hors-plan ont été ajoutées. La Figure 8.a présente les résultats obtenus en utilisant ce type de modèle.

L'éclatement de la structure étant principalement dû dans ce cas à des ruptures de fibres dans la couche circonférentielle la plus interne (Fig. 8.b), cette nouvelle méthode de détection de l'éclatement ne permet pas de réellement améliorer la précision des niveaux de pression d'éclatement par rapport au très simple critère précédent. Cependant, cela confirme que le mode d'éclatement associé à ce mode de rupture est sain (la jauge de déplacement axiale est expulsée vers l'intérieur du réservoir). De plus, ce modèle semble indiquer que la non linéarité du comportement axial n'est pas liée aux ruptures transverses ou par cisaillement des plis car ces phénomènes se développent partout dans la coque composite et n'ont presque pas d'influence sur la linéarité des résultats axiaux et radiaux.

Afin d'évaluer l'influence de l'épaisseur du composite dans les dômes, des calculs ont été effectués en considérant des épaisseurs de composite réduites uniquement dans ces zones (même si l'épaisseur des dômes n'est pas totalement représentative du procédé d'enroulement filamentaire dans ce cas). La figure 8.c montre les résultats obtenus.

Même si les valeurs numériques associées à ces résultats ne doivent être considérés (des caractéristiques approximatives de la coque composite ont été utilisées), les résultats montrent que la réduction de l'épaisseur du composite dans les dômes conduit à un changement dans le mode d'éclatement. En effet, les jauges de déplacement axial montrent une expulsion des embases métallique vers l'extérieur du réservoir ce qui correspond au mode non sain. Les caractéristiques du composite dans les dômes semblent être un paramètre important pour le mode d'éclatement du réservoir. La Figure 8.d montre les endommagements dans les fibres liés au mode d'éclatement non sain et explique l'origine de ce phénomène. La réduction d'épaisseur augmente les contraintes locales dans les fibres au niveau de la jonction des trois composants du réservoir (composite, embase et liner). Cela conduit à l'initiation d'une fissure dans les couches internes du composite. Ensuite, cette fissure se développe rapidement à travers l'épaisseur du composite et conduit à la séparation du bas du réservoir avec le reste de la structure.

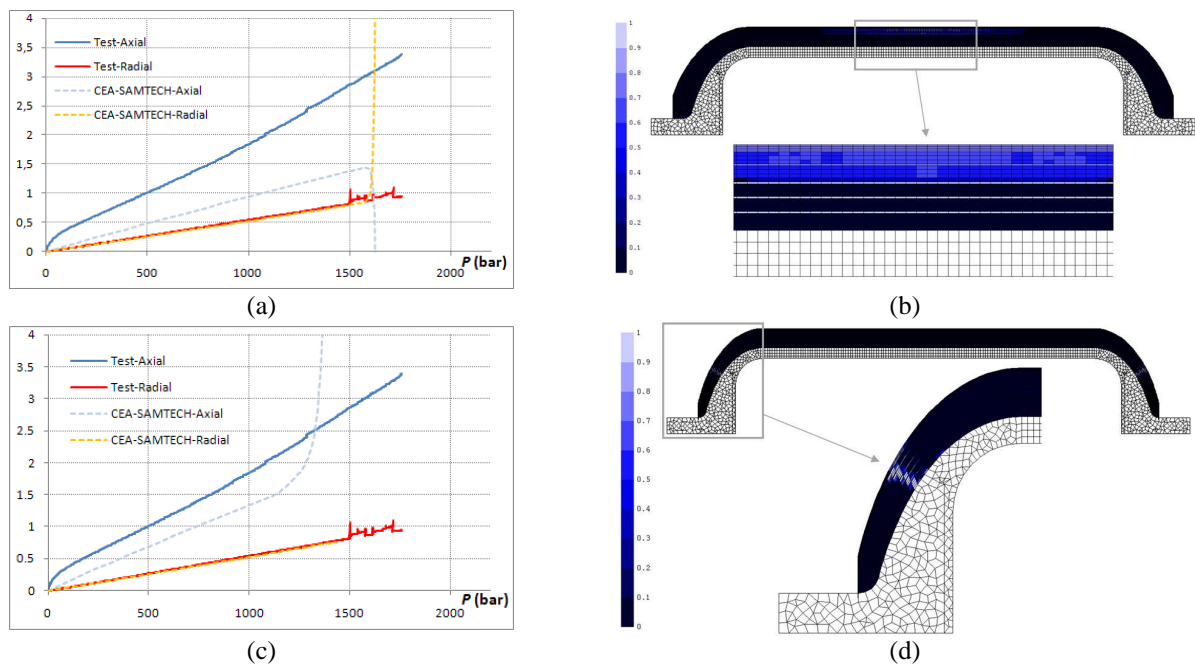


Fig. 8. Calcul en statique non linéaire avec loi d'endommagement sur le modèle initial : (a) jauges de déplacement et (b) endommagements dans les fibres ; et sur un modèle avec une épaisseur réduite de composite dans les dômes : (c) jauges de déplacement et (d) endommagements dans les fibres.

Même si ces premiers résultats montrent que les caractéristiques de la coque composite dans les dômes n'ont pas une influence élevée sur la pression d'éclatement quand la structuration conduit à un éclatement sain, ces derniers résultats soulignent l'importance de la précision de la modélisation dans cette zone afin de prédire le bon mode d'éclatement. Un partenaire a principalement effectué des travaux sur cette tâche. Il développe un nouveau modèle géodésique évaluant l'orientation et l'épaisseur des couches en considérant les caractéristiques du composite sur la partie cylindrique et la définition de la géométrie des dômes. Couplé à un algorithme d'optimisation, un tel outil est essentiel pour obtenir une évaluation précise des niveaux de contraintes dans les dômes et pour la prédiction d'éventuelles initiations et propagations de fissures.

#### 4. Travaux futurs.

Les travaux à venir visent à affiner les estimations des déplacements radiaux et axiaux, les masses et le mode de rupture en étudiant quatre voies d'amélioration :

- Amélioration de la connaissance du matériau : une estimation précise de la pression d'éclatement nécessite de comprendre les différents mécanismes d'endommagement (rupture de fibre, décohésions fibre/matrice, délaminage) qui conduisent à la rupture finale. Dans ce but, des essais sur des éprouvettes élémentaires sont prévus.

- Amélioration de la connaissance de l'architecture composite entière : les premiers résultats (et plus spécifiquement la dispersion observée sur le déplacement axial mesuré et simulé) montrent la nécessité d'une meilleure connaissance de la géométrie du réservoir surtout dans les dômes (orientation des fibres et épaisseurs des couches). Une analyse détaillée de la géométrie du réservoir sur une structure réelle améliorera les simulations.

- Amélioration des lois de comportement : les simulations présentées dans ce papier considèrent des hypothèses très simples : le comportement du composite est supposé linéaire élastique et la rupture a lieu dès qu'une contrainte dans les plis circonférentiels atteint la résistance à rupture d'une fibre. Des modèles d'endommagement non linéaire donneront des informations plus précises sur les dégradations progressives dans les plis hélicoïdaux et circonférentiels et à leurs interfaces. Un critère de rupture non local impliquant différentes orientations de fibres (et pas seulement les circonférentielles) conduira à une meilleure conformité entre les pressions d'éclatement simulées et mesurées. En parallèle de ces améliorations des modèles, des essais sur des structures simples (tube à section variable) sont prévus afin d'obtenir une base de données qui sera utilisable pour valider les hypothèses de modélisation.

- Amélioration des modèles EF : une représentation géométrique précise des dômes du réservoir ainsi que de sa séquence d'empilement reste un point clé pour mieux simuler le déplacement axial et la masse du composite. De plus, le contact parfait entre les embases, le liner et le composite semble trop simpliste car cette zone subit de forts niveaux de cisaillement. Un comportement plastique des embases métalliques doit également être pris en compte.

A long terme, la durabilité sous des sollicitations plus complexes sera testée et simulée : comme ces réservoirs d'hydrogène doivent être remplis et vidés plusieurs fois, la pression résiduelle d'éclatement devra être évalué après cyclage. L'influence de la température (dans la gamme  $-40^{\circ}\text{C}$  /  $85^{\circ}\text{C}$ ) sera également prise en compte.

## Remerciements

Nous remercions toutes les personnes qui ont participé à ce travail :

- ARMINES Mines ParisTech: Jacques Renard, Baramee Patamaprohm
- CEA: Julien Wilhelm, Christophe Magnier, Jean-Luc Yvernes, Pascal Tissier
- Institut P' : Damien Halm, Jean-Claude Grandidier
- SYMME - Polytech' Annecy-Chambéry : Philippe Saffré, Pascal Francescato
- Samtech France: Philippe Pasquet

Ce travail est 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] R. Wang et al, « A new method for predicting dome thickness of composite pressure vessels » J. of Reinforced Plastics and Composites, DOI: 10.1177/0731684410376330, 2010.
- [2] V.V. Vasiliev et al, « New generation of filament-wound composite pressure vessels for commercial applications » Composite Structures, Vol.62, pp.449-459, 2003.
- [3] J.S. Park et al, « Analysis of filament wound composite structures considering the change of winding angles through the thickness direction » Composite Structures, Vol.55, pp. 63-71, 2002.
- [4] L. Zu et al, « Design of filament-wound domes based on continuum theory and non-geodesic roving trajectories » Comp. Part A: Applied Science and Manufacturing, Vol.41, pp.1312-1320, 2010.
- [5] L. Mishnaevsky Jr et al, « Micromechanical modeling of damage and fracture of unidirectional fiber reinforced composites: A review » Computational Materials Science, Vol.44, pp.1351-1359, 2009.
- [6] S.M. Spottswood et al, « Progressive failure analysis of a composite shell » Composite Structures, Vol.53, pp.117-131, 2001.
- [7] C.U. Kim et al, « Optimal design of filament wound structures under internal pressure based on the semi-geodesic path algorithm » Composite Structures, Vol.67, pp.443-452, 2005.
- [8] A. Gillet, « Conception optimisée de structures constituées de matériaux composites thermoplastiques à fibres continues » Ph.D. thesis, Université de Savoie, France, 2005.
- [9] P. Ladeveze et al, « Damage modelling of the elementary ply for laminated composites » Composites Science and Technology, Vol.43, pp.257-267, 1992.