

## 06

## Avancées technologiques pour les réservoirs de véhicules électriques à hydrogène

résumé

Les véhicules électriques à hydrogène permettraient au transport de trouver une alternative à l'énergie fossile. Contrairement aux véhicules électriques à batterie, ils possèdent une autonomie et un temps de remplissage équivalents à ceux des véhicules thermiques actuels. Afin de limiter l'encombrement à bord du véhicule, l'hydrogène est stocké à 700 bar dans des réservoirs. Pour répondre au niveau élevé de sollicitation thermomécanique avec une masse réduite, des matériaux composites à fibres de carbone sont utilisés. Au travers de projets collaboratifs, le CEA – DAM travaille depuis de nombreuses années pour obtenir la meilleure utilisation possible de cette fibre de carbone. Les contraintes du procédé de fabrication du réservoir limitent les degrés de liberté de conception des structures composites. La qualité du matériau permet d'améliorer les performances des structures. La fabrication annuelle de millions de véhicules, et donc de réservoirs, annoncée par la Commission européenne pour 2030 nécessite un procédé rapide de haute qualité. Pour cela le CEA – DAM a développé des outils numériques et un procédé permettant de réduire significativement la masse de fibres de carbone et la durée de fabrication de la coque composite.

abstract

### Technological advances for hydrogen electric vehicles tanks

*Hydrogen electric vehicles would allow transport to find an alternative to fossil fuels; unlike battery-powered electric vehicles, they have a range and a filling time equivalent to those of current thermal vehicles. In order to limit the size on board the vehicle, the hydrogen is stored at 700 bar in a tank. To meet the high level of thermomechanical stress with a reduced mass, carbon fibre composite materials are used. Through collaborative projects, the CEA – DAM has been working for many years to obtain the best possible use of this carbon fibre.*

*The constraints of the tank manufacturing process limit the degrees of freedom in the design of composite structures. The quality of the material makes it possible to improve the performance of the structures. The annual production of millions of vehicles, and therefore of tanks, announced by the European Commission for 2030 requires a rapid, high quality process. For this the CEA – DAM has developed digital tools and a process that significantly reduce the mass of carbon fibre and the manufacturing time of the composite shell.*

**L**es véhicules électriques à hydrogène permettraient au transport de trouver une alternative à l'énergie fossile, à l'origine de 14 % des émissions de CO<sub>2</sub>, principal contributeur à l'effet de serre. En effet, ils garantissent une autonomie et un temps de remplissage équivalents à ceux des véhicules thermiques actuels, alors que les véhicules électriques à batterie requièrent un temps de recharge de plusieurs heures.

Aujourd'hui, des sociétés de transport, comme la société de taxi Hype à Paris, utilisent quelques centaines de véhicules électriques à hydrogène, mais le coût d'achat de ces véhicules est très élevé – entre 60 000 et 80 000 euros pour une berline – avec une cadence annuelle de fabrication

mondiale de l'ordre de la dizaine de milliers de véhicules, à comparer aux cent millions de véhicules thermiques fabriqués annuellement.

Pour que cette filière se développe, ces véhicules doivent être économiquement accessibles tout en ayant un niveau de sécurité égal ou supérieur à celui des véhicules thermiques actuels ; ils doivent aussi avoir des cycles de fabrication courts. Des efforts économiques doivent être réalisés sur la pile à combustible qui génère l'électricité à partir de l'hydrogène et sur la partie stockage de l'hydrogène. Le CEA est fortement impliqué dans les technologies de l'hydrogène : pile à combustible, production de l'hydrogène sur le centre CEA de Grenoble ; stockage sur le centre CEA – DAM du Ripault ; sécurité,

## AUTEURS

S. Villalonga  
H. Mathis  
C. Magnier  
CEA – DAM  
Centre du Ripault

technico-économie sur le centre CEA de Paris-Saclay. Il regroupe un ensemble de compétences et de moyens uniques et a contribué, avec l'Ademe, à l'établissement de la feuille de route hydrogène française.

Concernant le stockage embarqué, la technologie mature est celle du stockage de l'hydrogène gazeux à 700 bar dans un réservoir composite à fibres de carbone avec une paroi interne en matériau polymère. Au début des années 2000, le CEA - DAM s'est engagé dans le développement de cette technologie de réservoir. Depuis quelques années, les objectifs visent à augmenter les cadences de fabrication et à réduire les coûts.

La première partie de l'article fournit une description d'un réservoir à hydrogène développé et mis au point au CEA - DAM. La deuxième partie présente le procédé de fabrication et les solutions technologiques qui ont été brevetées avec la société Coriolis MF Tech pour que la cadence de fabrication se rapproche des exigences de l'industrie automobile. Enfin, la troisième partie montre comment la quantité de fibres de carbone, qui représentent une part importante du coût élevé du réservoir, peut être réduite tout en maintenant ses performances et les contraintes de sécurité; ces travaux ont été menés initialement dans le cadre du projet Copernic [1] financé par la Commission européenne et piloté par le CEA - DAM.

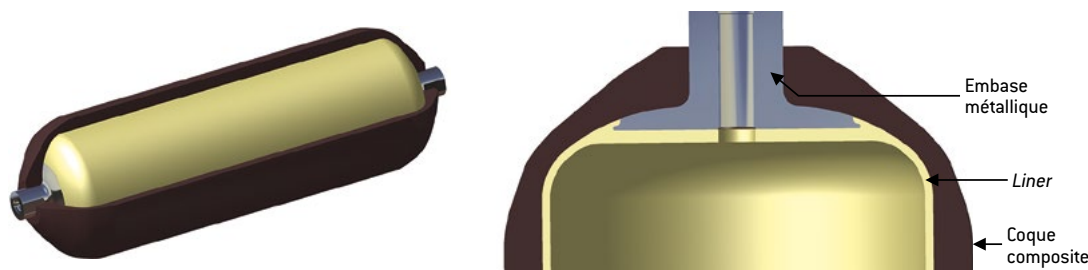
### Description d'un réservoir à hydrogène

Un réservoir de type IV (figure 1) est un réservoir qui permet le stockage d'un gaz sous forte pression avec une coque composite et une paroi interne, appelée *liner*, en matériau polymère. Le gaz est ici de l'hydrogène gazeux  $H_2$  à 700 bar.

Le *liner*, de quelques millimètres d'épaisseur, a une fonction d'étanchéité à l'hydrogène qu'il renferme; il résiste sans se fissurer à plusieurs dizaines de milliers de remplissages. Aux extrémités du *liner* se trouvent deux embouts métalliques appelés embases qui permettent de relier le réservoir à la pile à combustible et au système de remplissage. Ayant comme fonction la structuration mécanique du réservoir, la paroi externe est une coque de quelques centimètres d'épaisseur, constituée d'un matériau composite à base de fibres de carbone (voir encadré) et d'une résine polymère. Cette coque est légère, peu sensible au nombre de remplissages et très résistante: elle permet au réservoir de résister à des pressions de l'ordre de 1 800 bar.

Pour le stockage embarqué de l'hydrogène, le réservoir doit subir une série de tests réglementaires pour être homologué [2]. Une des principales caractéristiques d'un réservoir homologué est sa capacité gravimétrique, définie comme le rapport entre la masse d'hydrogène et la masse du réservoir chargé en hydrogène. Aujourd'hui, les réservoirs des véhicules en circulation (Toyota Mirai, Hyundai Nexo) ont une capacité gravimétrique voisine de 5,5%. Néanmoins, l'Europe vise une capacité de 6% pour minimiser la masse du système de stockage.

Un kilogramme d'hydrogène procure 100 km d'autonomie, il faut donc au moins 5 kg d'hydrogène par véhicule pour une autonomie d'au moins 500 km. Sachant qu'à 700 bar et 15 °C, un volume de 25 litres est nécessaire pour stocker 1 kg d'hydrogène gazeux, un volume interne de stockage de 125 litres est donc requis. L'intégrateur automobile implante ce volume dans un véhicule sous la forme d'un, deux ou trois réservoirs



**Figure 1** Représentation d'un réservoir dit de type IV constitué en gris d'embases métalliques pour relier le réservoir à la pile à combustible et au système de remplissage, en jaune d'un *liner* en matériau polymère pour l'étanchéité à l'hydrogène et en noir d'une coque en matériau composite à fibres de carbone pour la structuration mécanique. Pour un réservoir de 62 L et 2,5 kg d'hydrogène, le diamètre extérieur est de l'ordre de 40 cm, la longueur de 90 cm; la fibre de carbone représente 60% de la masse totale du réservoir.

## ENCADRÉ

## Production, propriétés et intérêt des fibres de carbone

D. Brandt, CEA – DAM, centre du Ripault

La fibre de carbone est un matériau qui se présente sous la forme de minces filaments de 5 à 10  $\mu\text{m}$  de diamètre et qui est composé à plus de 90 % de carbone. Elle est obtenue par carbonisation de fibres d'un polymère appelé précurseur, dont le plus couramment utilisé est le polyacrylonitrile (PAN), qui représente plus de 90 % de la production mondiale. Le PAN est synthétisé par polymérisation radicalaire d'acrylonitrile, puis filé au travers d'une filière de 1 000 à 100 000 trous. Les fibres obtenues subissent ensuite une série de traitements thermiques afin d'être transformées en fibres de carbone. Une étape d'oxydation par chauffage sous air permet de rendre la fibre infusible, puis un premier traitement de carbonisation sous atmosphère inerte permet d'obtenir une fibre de carbone. Si des fibres de plus haut module sont nécessaires, un troisième traitement thermique, dit de graphitisation, est réalisé vers 2 000-2 500 °C. Enfin, une très fine couche de polymère est déposée à la surface des fibres. Cette couche, appelée ensimage, a pour double rôle de protéger la fibre lors du stockage et du transport, et d'améliorer l'interface avec la matrice lors de la fabrication du matériau composite. Les fibres de carbone possèdent des propriétés mécaniques, notamment la contrainte à la rupture et le module de Young,

supérieures à la plupart des matériaux. En particulier, les rapports entre leurs propriétés mécaniques et leur densité les classent parmi les meilleurs matériaux usuels. Ce sont ces propriétés spécifiques qui confèrent aux composites à base de fibres de carbone leur alliance de résistance et de légèreté et qui en font des matériaux de choix pour de nombreux domaines : aérospatiale, énergie (éolienne), automobile, sport, etc. La fibre de carbone est principalement utilisée pour fabriquer des composites à hautes propriétés mécaniques. Pour cela, la fibre est intégrée au sein d'une matrice, le plus souvent en polymère, permettant de lier et de maintenir les fibres entre elles. La qualité d'un composite et ses propriétés dépendent bien sûr de la qualité et de la nature de la fibre et de la matrice, mais aussi de l'architecture utilisée. L'architecture correspond au contrôle de l'orientation des fibres au sein du matériau. En effet, la fibre se comportant comme un élément unidimensionnel, elle n'apporte ses propriétés au matériau que dans la direction de sa longueur, ce qui crée automatiquement une anisotropie dans le composite. Pour obtenir des composites avec des propriétés mécaniques intéressantes dans plusieurs directions, il est donc nécessaire de maîtriser l'orientation de la fibre dans le matériau. Cette architecture est généralement obtenue par tressage, tissage ou bobinage.

de tailles différentes, dans l'axe du véhicule ou transversalement.

Dans le cas d'un réservoir de 62 L et 2,5 kg d'hydrogène, standard actuel de l'automobile (illustré sur la **figure 1**), les dimensions du réservoir sont de l'ordre de 40 cm de diamètre et 90 cm de longueur ; sa masse totale est de l'ordre de 55 kg, dont 33 kg de fibres de carbone.

### Réduction du temps de fabrication de la coque composite

#### Fabrication de la coque composite

Aujourd'hui, les rares industriels qui fabriquent la coque composite des réservoirs le font le plus souvent au moyen de machines dédiées au procédé dit d'enroulement filamentaire par voie humide [3]. Ce procédé se décompose en trois étapes : l'imprégnation par une matrice polymère liquide d'un renfort constitué de fibres de carbone, la dépose sous contrainte

(fibre sous tension mécanique) par enroulement suivant une trajectoire bien définie autour du *liner*, servant de mandrin en rotation, et, enfin, la polymérisation de la matrice réalisée dans une étuve.

Pour le réservoir de 62 L, il faut entre 1 h 30 et 2 h pour l'imprégnation et la dépose du composite. Ensuite, la polymérisation de la matrice du composite nécessite entre 10 h et 16 h selon la nature du polymère. Ces temps de fabrication doivent être réduits afin d'être acceptables pour une production de masse dans l'industrie.

Le renfort est constitué de mèches composées chacune de 24 000 fibres de carbone de 7  $\mu\text{m}$  de diamètre. Le choix du type de fibre de carbone est important, car c'est elle qui détermine en grande partie les propriétés mécaniques du matériau composite. La mèche est fournie enroulée par le fabricant sous forme d'une bobine et

plusieurs bobines sont utilisées à la fois pour limiter le temps de fabrication. Elles sont placées dans un dévidoir à partir duquel les mèches sont acheminées sous tension mécanique vers un bac d'imprégnation puis vers la tête de dépose. Plusieurs mèches juxtaposées constituent une nappe. Grâce à ses mouvements, la tête de dépose positionne la nappe imprégnée sur le mandrin en rotation. La tension mécanique de la mèche permet d'assurer le compactage du composite.

La matrice est un matériau polymère organique époxyde qui permet, une fois polymérisée, de lier de façon rigide toutes les fibres de carbone, de transmettre et de répartir les efforts mécaniques subis par la structure sur l'ensemble des fibres. La gestion de l'imprégnation des mèches par la matrice n'est pas purement mécanique. En effet, la matrice est fabriquée à partir d'un mélange de liquides organiques réactifs constitués d'une résine, d'un durcisseur, voire d'un accélérateur. Les réactifs sont préalablement mélangés puis déversés par lots dans le bac d'imprégnation. Le mélange liquide de matrice progresse autour des milliers de fibres pour idéalement imprégner toute leur surface et remplir l'espace occupé initialement par l'air. La vitesse de réaction de polymérisation doit être connue et maîtrisée pour que la variation de viscosité du mélange permette une bonne imprégnation tout au long du bobinage. La vitesse de défilement de la nappe fixe le temps de séjour des fibres dans le bac. Les conditions ambiantes de température et d'hygrométrie sont également très importantes et conditionnent la qualité du matériau et les performances du réservoir. Une fois bobiné, le réservoir est placé dans une étuve pour augmenter la température du matériau et permettre la polymérisation (solidification) de la matrice.

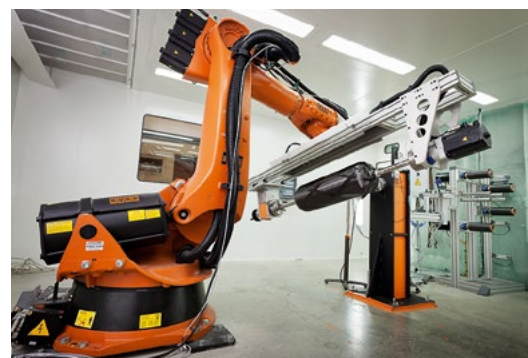
### Augmentation de la vitesse de fabrication de la coque composite

Pour accélérer la fabrication, il est possible d'acquérir des bobines dont les mèches sont préimprégnées de résine. Ce semi-produit, appelé *tow-preg* ou *prepreg*, est plus cher pour un nombre réduit de réservoirs fabriqués, mais le fournisseur garantit un haut niveau de qualité d'imprégnation. Il demande également une gestion plus contraignante du stockage à  $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Ce type de matériau a été choisi pour améliorer la qualité et augmenter la précision de dépose. Ce choix a été renforcé par les projections industrielles réalisées par des bureaux d'études [4],

indiquant qu'à grande échelle, la voie préimprégnée n'est pas plus coûteuse que la voie humide.

En partenariat depuis 2005 avec la société Coriolis MF Tech, près d'Alençon, le CEA – DAM a formulé des spécifications pour l'adaptation d'un robot industriel (figure 2). Grâce à une gestion dédiée des mèches, à une stratégie de programmation des trajectoires et à une architecture fibreuse optimisée, une dépose plus rapide des fibres a été obtenue [1] et la qualité du matériau (faibles défauts, faible niveau de porosité) a été conservée. Le choix de fourniture de mèches préimprégnées couplé au développement d'un robot permet ainsi de doubler la vitesse de bobinage et de diminuer de moitié le temps de bobinage d'une coque composite. Trois brevets ont été déposés sur ce procédé par le CEA – DAM en 2021 [5-7].

L'étape la plus longue dans la fabrication des composites de carbone à matrice époxyde est la phase de polymérisation de la matrice. En général, pour les réservoirs de type IV, il n'est pas autorisé de polymériser la matrice du composite à une température supérieure à une valeur égale à la température de ramollissement du *liner* moins  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ , ce qui limite fortement les vitesses de polymérisation. Pour cette raison, le CEA – DAM développe, dans le cadre du projet collaboratif ANR Fastcure 2, qu'il pilote et met en œuvre avec l'Insa de Lyon et la société Vitech Composites, un préimprégné époxyde à cuisson rapide. La possibilité de polymériser la matrice du composite en moins de 4 h 45, soit deux à trois fois plus rapidement, a été démontrée. Un dépôt de brevet est en cours.



**Figure 2**  
Robot conçu sur le centre CEA – DAM du Ripault, mis au point et fabriqué par la société Coriolis MF Tech pour l'enroulement filamentaire avec une vitesse moyenne de dépose des fibres de carbone préimprégnées de l'ordre de 50 m/min, doublée par rapport à l'état de l'art.

Ainsi, pour le réservoir de 62 L, la durée totale de fabrication et de polymérisation de la coque composite devrait être considérablement réduite pour atteindre 5 h 30 seulement.

### Réduction du coût de la coque composite

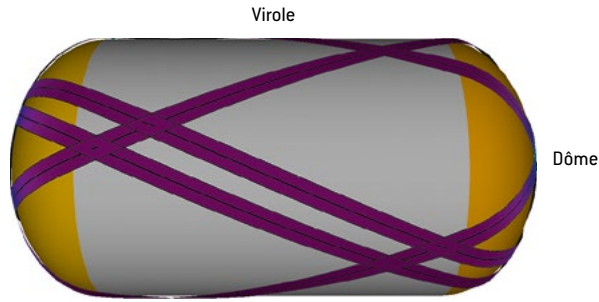
Au cours du projet Copernic (2013-2016) [1], financé par la Commission européenne, piloté par le centre CEA – DAM du Ripault et qui visait à réduire le coût et à augmenter les performances des réservoirs, des études technico-économiques ont été réalisées avec le centre CEA de Grenoble : elles ont montré que la technologie actuelle est coûteuse. Pour la rendre compétitive, il s'est avéré nécessaire d'optimiser à la fois le procédé, comme cela a été montré précédemment, et la conception de la coque composite du réservoir.

### Conception par simulation d'une coque composite

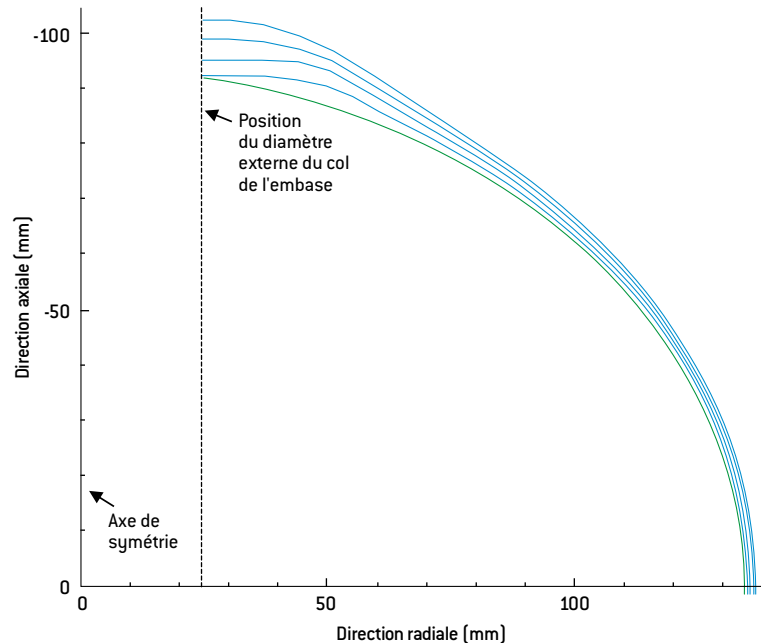
Le CEA – DAM s'appuie sur la simulation numérique pour concevoir et dimensionner un réservoir, avec comme objectif de minimiser la masse de fibres de carbone nécessaire à sa fabrication pour réduire son coût. Pour y parvenir, une boucle d'optimisation a été mise en place. À partir d'un modèle géométrique initial du réservoir, une simulation de son comportement sous pression est réalisée, permettant d'identifier les zones du réservoir pour lesquelles une diminution de la quantité de fibres n'affaiblira pas sa tenue mécanique. Des itérations successives, entre évolution du modèle géométrique et vérification de sa résistance par la simulation, permettent de proposer un concept de réservoir optimisé.

La résistance mécanique de la coque tient principalement à la nature de sa fibre et à son architecture de bobinage, à commencer par l'angle d'enroulement et l'épaisseur en virole de chaque couche déposée. Cette architecture de plusieurs dizaines de couches est conçue par calcul au bureau d'études. L'idée générale est d'alterner des couches radiales (dites circonférentielles) et axiales (dites hélicoïdales) pour contenir la pression du réservoir selon ces directions. La flexion du dôme doit également être régulière de manière à ne pas créer de points singuliers.

Grâce à un outil de simulation de la dépose du matériau par le procédé d'enroulement filamentaire (figure 3), il est possible d'avoir une représentation des couches de composite. Cette simulation permet de tenir compte des variations d'épaisseur et d'angle de chaque couche déposée



**Figure 3** Visualisation d'une simulation du procédé d'enroulement filamentaire, après plusieurs allers-retours de dépose selon une trajectoire hélicoïdale d'une nappe de fibres de carbone imprégnées. Un modèle géométrique de coque composite est ainsi obtenu, renseignant sur les épaisseurs et les angles des couches (le logiciel commercial Compositcad a ici été utilisé).



**Figure 4** Coupe à la hauteur du fond hémisphérique du réservoir de l'empilement des couches. Un maillage s'appuyant sur les contours de cet empilement est réalisé pour les calculs mécaniques axisymétriques à l'aide d'Abaqus® (figure 5).

le long de l'axe du mandrin avec une représentation 2D axisymétrique (figure 4), tout en tenant compte des limitations liées aux possibilités de glissement de la nappe durant sa dépose sur les fonds.

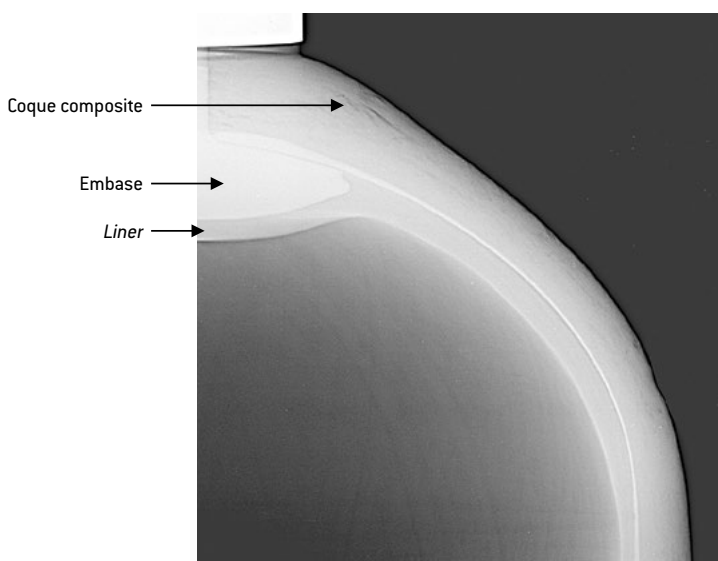
Cette simulation prend en compte la largeur de la nappe, son épaisseur et son niveau d'imprégnation. Les nappes restent parfaitement jointives les unes par rapport aux autres avec un compactage optimal.

À partir du modèle géométrique de la coque composite, le code de calcul par éléments finis Abaqus® est utilisé pour simuler, en conditions

de chargement quasi statique, le comportement mécanique de la structure composite associée au *liner* et aux embases métalliques. Pour tenir compte des effets du procédé sur les propriétés du matériau, des caractérisations sont réalisées sur des plaques composites afin de fournir dans Abaqus® des données d'entrée réalistes. À partir de ces propriétés et des lois de comportement des matériaux, de conditions initiales et de conditions aux limites, il est possible d'estimer les performances du réservoir comme la valeur de sa pression maximale de résistance. Les simulations mécaniques sont à la fois utilisées pour concevoir la structure composite d'un réservoir et pour l'analyse comparative de différents concepts.

**Optimisation de l'architecture composite**

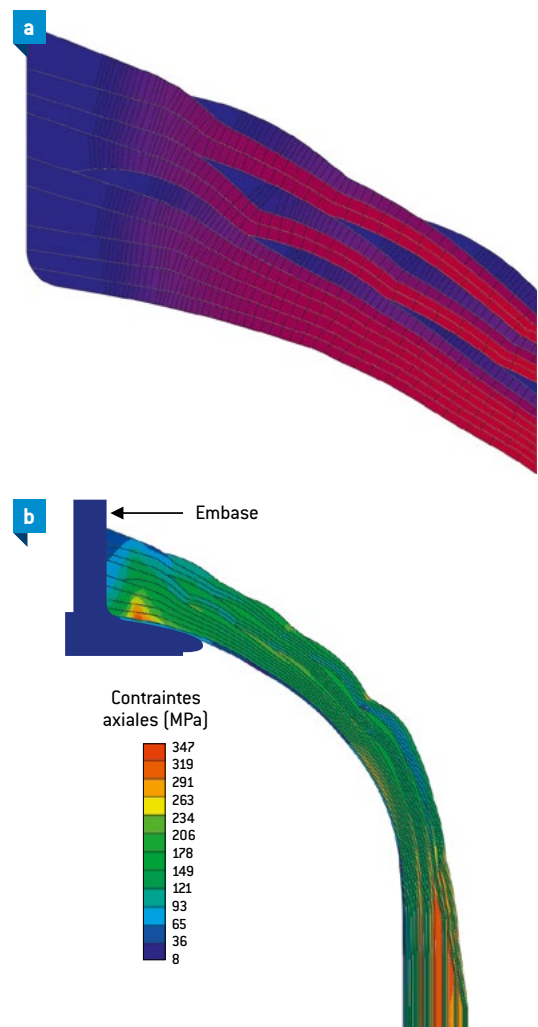
Une fois l'architecture composite définie, la fabrication du réservoir peut débuter. En général, la structure fabriquée diffère légèrement de sa définition, car les trajectoires de la machine sont légèrement différentes de celles du simulateur du procédé. Après la phase d'enroulement filamentaire et le passage du réservoir en étuve, des écarts apparaissent dans la géométrie et des défauts peuvent apparaître. Ces écarts croissent logiquement de quelques millimètres avec la superposition des couches dans la coque.



**Figure 5** Exemple de radiographie par rayons X d'un réservoir d'étude du CEA – DAM fabriqué sur la base des paramètres du modèle géométrique établi (figures 3 et 4), permettant de contrôler la géométrie de la coque composite une fois bobinée et polymérisée et les écarts au modèle numérique.

Une radiographie par rayons X (figure 5) renseigne sur la géométrie réelle de la coque composite et sur la présence éventuelle de porosité ou de délaminage.

Afin d'améliorer la représentativité de la simulation de l'enroulement filamentaire implanté dans Abaqus®, le centre CEA – DAM du Ripault a développé en 2018 un programme nommé Fiwiqus [8]. Il tient compte de la dépendance des caractéristiques des matériaux composites à l'angle d'enroulement et est utilisé pour les



**Figure 6** (a) Représentation plus réaliste que celle de la figure 4 de l'empilement des couches obtenue à l'aide du logiciel Fiwiqus développé sur le centre CEA – DAM du Ripault et permettant un maillage dans Abaqus®. (b) Résultat d'une simulation avec Abaqus® présentant la cartographie des contraintes, exprimées en MPa, dans la direction locale des fibres de carbone lorsque le réservoir est soumis à une pression interne. Des itérations successives permettent d'optimiser l'enroulement et l'épaisseur de la coque pour minimiser la masse de fibres de carbone en conservant un niveau de contrainte acceptable dans la coque.

phases de conception, de recalage et d'analyse de comportement des réservoirs. Grâce à ce nouvel outil, la superposition des couches et l'impact d'une ondulation d'une couche sur la couche supérieure sont mieux représentés (**figure 6**).

L'apport de *Fiwiquis* à une meilleure représentation de la géométrie des réservoirs a été validé en exploitant des radiographies X faites en fin de polymérisation. Avec un modèle recalé, il est donc maintenant possible de simuler plus précisément le comportement thermomécanique du réservoir. Il devient également possible d'imaginer et de concevoir de nouvelles architectures fibreuses pour réduire la masse de fibres de carbone tout en maintenant les performances du réservoir avec un nombre limité de fabrications et de tests.

Une démarche itérative d'optimisation a ainsi été engagée : elle a permis d'obtenir une réduction de 20 % de la masse de fibres de carbone, ce qui représente une réduction de 15 % du coût de fabrication du réservoir.

## Conclusion

Le CEA – DAM a développé un savoir-faire en conception, dimensionnement, fabrication, instrumentation, tests d'homologation et suivi de la santé matière des réservoirs composites à fibres de carbone et avec un *liner* polymère pour le stockage embarqué de l'hydrogène gazeux. Cet objet pose de nombreux défis scientifiques et technologiques, et des avancées ont été obtenues.

Sur une base de robot industriel, le développement technologique du procédé d'enroulement filamentaire a permis de doubler la vitesse moyenne de dépose et d'augmenter la cadence de fabrication des réservoirs. Pour aller plus loin, des études d'une forte réduction de la durée de polymérisation ont été menées à bien et devraient être bientôt validées à l'échelle industrielle. L'objectif est de rendre les cadences de production plus compatibles avec les exigences d'une industrie devant produire des millions de véhicules.

Le développement d'outils numériques plus précis pour la simulation et la fabrication, financé par le plan de relance européen pour la transition énergétique, a conduit le CEA – DAM à démontrer qu'il était possible de diminuer la masse de fibres de carbone et de réduire de 15 % le coût du réservoir, ce qui représente une économie considérable pour un industriel.

## RÉFÉRENCES

[1] **THE FUEL CELLS AND HYDROGEN JOINT UNDERTAKING (FCH JU)**, « Copernic project: lowering costs of hydrogen storage tanks », p. 40-42, dans *FCH JU Success Stories – A partnership dedicated to clean energy and transport in Europe*, [www.fch.europa.eu](http://www.fch.europa.eu), ISBN 978-92-9246-330-4 (2018).

[2] **UNECE (Commission économique pour l'Europe des Nations unies)**, « Regulation R134 », E/ECE/TRANS/505/Rev.2/Add.133 (2015).

[3] **D. B. MIRACLE, S. L. DONALDSON** (editors), *Composites*, dans *ASM Handbook, ASM International*, vol. 21, ISBN 0-87170-703-9 (2001).

[4] **K. RITTER**, « H2CPV material and manufacturing », communication orale à la convention *Pressurized Hydrogen and Storage Equipment* (PHASE 2018), Tours, France, 15-16 mai 2018.

[5] **C. MAGNIER, S. VILLALONGA**, « Dispositif de dévidement d'une bobine de fibres de carbone », brevet déposé le 26/04/2021 à l'Institut national de la propriété intellectuelle sous le n° 2104315.

[6] **C. MAGNIER, S. VILLALONGA**, « Tête de dépose pour une installation d'enroulement filamentaire », brevet déposé le 24/12/2020 à l'Institut national de la propriété intellectuelle sous le n° 2014064.

[7] **C. MAGNIER, S. VILLALONGA**, « Porte-bobine piloté pour une installation d'enroulement filamentaire », brevet déposé le 24/12/2020 à l'Institut national de la propriété intellectuelle sous le n° 2014078.

[8] **H. MATHIS, M. RAYMOND, C. DELHOMME**, *Fiwiquis, version 1.1, logiciel de modélisation d'une coque composite bobinée par enroulement filamentaire*, Agence pour la protection des programmes, numéro de dépôt IDD.N.FR.001.040015.000.S.P.2019.000.20600.