



RÉPUBLIQUE  
FRANÇAISE

*Liberté  
Égalité  
Fraternité*



*maîtriser le risque  
pour un développement durable*

# SÉCURITÉ ET PROTECTION DES RÉSERVOIRS HYPERBARES D'HYDROGÈNE

Opération B2 du programme IDE10

Jérôme Daubech

18/01/2024

Ineris - 211974 - 2760094 - v1.0

# 1. Contexte et objectifs

# Contexte

Dans les conditions ambiantes de pression et température, l'hydrogène se présente à l'état gazeux avec une densité très faible de l'ordre de  $0,085 \text{ kg/m}^3$  (pour comparaison, l'essence est liquide avec une densité de  $750 \text{ kg/m}^3$ ). L'hydrogène est un gaz très énergétique puisque  $1 \text{ kg d'H}_2$  libère  $120 \text{ MJ}$  (pour l'essence,  $1 \text{ kg d'essence}$  libère  $45 \text{ MJ}$ ). Cependant ramenée au volume, la densité énergétique de l' $\text{H}_2$  n'est donc que de  $11 \text{ MJ/m}^3$  (pour l'essence,  $33750 \text{ MJ/m}^3$ ).

**En raison de sa faible densité, le stockage de l'hydrogène pose un réel défi technique et économique.**

Ainsi, une des solutions principales pour augmenter les masses d'hydrogène stockées est l'utilisation de réservoirs hyperbares qui permet de stocker l'hydrogène sous très haute pression pour les applications stationnaires et mobiles. Il s'agit d'une clé pour le déploiement de la filière.

L'éclatement d'un réservoir en fonctionnement, par exemple sous l'effet d'un feu ou d'un choc mécanique, est un scénario dont les effets sont très importants.

Les réservoirs hyperbares d'hydrogène sont soumis à différentes réglementations selon leur application :

- la directive ESP pour les applications stationnaires ;
- la directive ESPT (TMD) pour les applications mobiles hors véhicules routier ;
- le règlement ONU R134 pour les véhicules routiers.

# Contexte

Ces réservoirs subissent un certain nombre de tests abusifs, leur permettant de répondre à des exigences de sécurité en termes de tenue mécanique aux agressions externes.

Cependant, si on prend l'exemple d'une agression thermique :

- les réservoirs doivent tenir au feu entre 2 et 5 min (selon la version de la directive) → Est-ce que cette agression est représentative des expositions réelles des réservoirs à un feu ?
- la réglementation (TMD, notamment) n'impose pas de mesures de sécurité particulières.

Différentes techniques sont à l'étude pour empêcher l'éclatement ou limiter les effets. La plus répandue est certainement le fusible thermique (TPRD), qui permet de décharger le réservoir rapidement en cas d'incendie. Mais, outre des effets résiduels non négligeables (fuite, feu torche), la fiabilité de ces dispositifs pose question, que ce soit en cas d'ouverture intempestive, ou bien en absence d'ouverture si le fusible n'est pas exposé directement à l'incendie. Des techniques alternatives sont en développement, par exemple pour rendre le réservoir « fuyard » avant éclatement.

Dans cette opération, il est proposé de dresser un état de l'art de ces différentes technologies, en soulignant leurs avantages et inconvénients, leur performance par rapport aux types d'agression possibles et leur degré de maturité. Cette étude se basera sur la littérature disponible, et notamment sur les résultats des plus récents projets européens sur le sujet (HYRESPONSE, HYTUNNEL, etc...).

# Objectifs

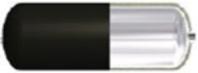
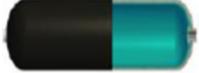
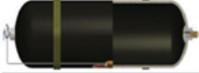
Les objectifs de ce travail sont de :

- Présenter les différentes technologies de réservoirs et des systèmes de stockage ;
- Recenser les agressions d'un réservoir H2 (mécaniques, thermiques, ...) ;
- État de l'art des travaux expérimentaux menés sur les agressions des réservoirs dans les cadres de projets de recherche (projets européens, Anr, ...) ;
- Etat de l'art des techniques de mitigation étudiées et envisagées.

## **2. Présentation des technologies des réservoirs et systèmes de stockage**

# Présentation des technologies des réservoirs

Il existe 5 types de technologies de réservoirs différentes :

Type de réservoir	I	II	III	IV	V
Technologie	Réservoir complètement métallique en acier ou aluminium	Réservoir métallique en acier ou aluminium avec un renforcement circonférentiel (fibre de carbone, fibre de verre et résine)	Réservoir composite composé d'un liner métallique (acier ou aluminium) entièrement enveloppé d'un bobinage de fibre de carbone, fibre de verre et résine	Réservoir composite composé d'un liner polymère entièrement enveloppé d'un bobinage de fibre de carbone, fibre de verre et résine	Réservoir complètement composite sans aucun liner
Illustration					

# Présentation des technologies des réservoirs



## Réservoirs de type I :

- sans soudure en acier ou en aluminium ;
- très lourds, à parois épaisses pour des pressions nominales de service élevées ;
- L'acier des réservoirs est sensible à la fragilisation par l'hydrogène ;
- conçus pour des pressions ne dépassant pas 250 bar ;
- Solution de stockage relativement bon marché pour les applications stationnaires.



## Réservoirs de type II :

- métalliques sans soudure ;
- coque métallique renforcée circonférentiellement par des fibres de carbone coulées dans la résine ;
- peuvent résister à des pressions allant jusqu'à 450 à 1000 bar ;
- Souvent utilisés comme des réservoirs tampons haute pression dans les stations de remplissage d'hydrogène ;
- Leur coût est compétitif en raison du faible nombre de fibres.

**Ne convient pas aux applications automobiles en raison des contraintes de poids et de volume.**

# Présentation des technologies des réservoirs

Pour des pressions nominales de service élevés (typiquement supérieure à 300 bar), ces réservoirs sont plus légers et leurs parois sont plus minces que celles des réservoirs de type I et II.

Réservoirs de type III :

- Liner en aluminium (ou acier pour les réservoirs les plus anciens) sans soudure ou soudé ;
- La résistance mécanique à la pression est assurée par une coque composite en fibre et résine ;
- Moins affectés par la fragilisation par l'hydrogène ;
- conçus pour des pressions maximales de service pouvant atteindre 700 bar.



Réservoirs de type IV :

- Liner non métalliques (en plastique) enveloppées d'une matrice en fibre/polymère ;
- Les têtes de réservoir sont des ogives métalliques permettant d'accueillir les entrées et sorties du gaz ;
- La résistance mécanique à la pression est assurée par une coque composite en fibre et résine ;
- Bien que les cylindres soient plus légers que les cylindres entièrement métalliques, ils sont plus coûteux ;
- conçus pour des pressions maximales de service pouvant atteindre 700 bar ;
- Inconvénient : Risque de perméation de l'hydrogène à travers le liner et d'accumulation d'hydrogène entre le liner et la paroi composite.

# Présentation des systèmes de stockage

Pour les réservoirs de type I, on peut retrouver :



Des bouteilles de 50 litres seules.



Des bouteilles de 50 litres assemblées en cadre de 9 à 18 réservoirs destinées à des installations stationnaires ou pour le transport sous des pressions de 200 bar



Des réservoirs allongés (appelés « cigares ») de 1100 à 1900 litres sous des pressions de 200 à 380 bar



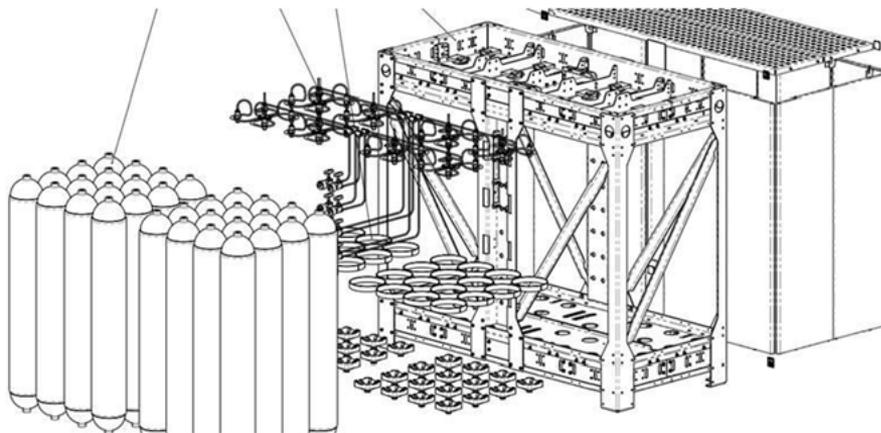
Des cuves de stockage de plusieurs dizaines de m<sup>3</sup> à plusieurs dizaines de bar

# Présentation des systèmes de stockage

Pour les réservoirs de type II, on peut retrouver :



Des bouteilles de 50 litres ou des  
réservoirs de 150 à 800 litres sous des  
pressions de 300 à 1000 bar



Des bouteilles de 50 litres assemblées en cadre de 9 à 18  
réservoirs destinées à des installations stationnaires sous une  
pression de 450 à 1000 bar

# Présentation des systèmes de stockage

Les réservoirs de type III et de type IV ont des usages similaires. On peut retrouver :



Des bouteilles de 200 à 350 litres  
assemblées en cadre de 4 à 12  
réservoirs destinées à des installations  
stationnaires sous des pressions de 200  
à 700 bar



Des bouteilles de 200 à 350 litres  
assemblées en container de plusieurs  
dizaines de réservoirs (jusqu'à 115  
réservoirs) destinées aux transports ou  
aux applications stationnaires sous des  
pressions de 200 à 950 bar



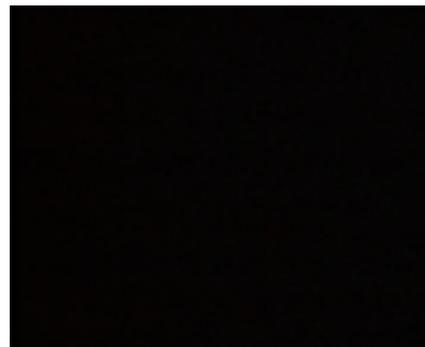
Des réservoirs allongés (appelés  
« cigares ») de 1100 à 2000 litres sous  
des pressions de 350 à 500 bar destinés  
aux transports ou aux applications  
stationnaires .

# **3. Causes et conséquence d'éclatement des réservoirs de stockage d'hydrogène**

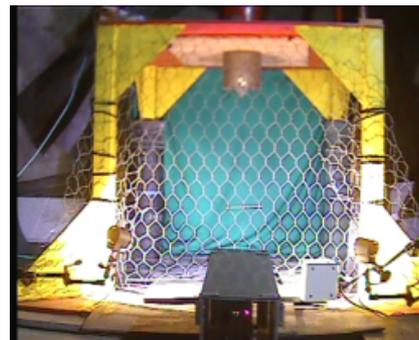
# Causes d'éclatement des réservoirs de stockage d'hydrogène

Les causes d'éclatement d'un réservoir d'hydrogène sont les suivantes :

- Un sur-remplissage (ou erreur au remplissage) → La pression dans le réservoir augmente jusqu'à atteindre la rupture du réservoir ;
- Une agression thermique de type feu → Le réservoir est pris dans un feu englobant ou partiel. La pression dans le réservoir peut augmenter. Les propriétés de résistance mécanique se dégradent à mesure que la température de la paroi augmente. Sans protection, le réservoir peut rompre ;
- Une agression mécanique de type choc, impact de projectile, écrasement, chute, ... → Le réservoir subit un endommagement mécanique qui suivant son intensité et le comportement des parois du réservoir peut entraîner sa rupture ;
- La fatigue mécanique → Le remplissage et la dépressurisation des réservoirs d'hydrogène entraîne des sollicitations fortes en termes de contraintes en pression et température qui peut engendrer dans le temps l'éclatement du réservoir ;
- Une explosion interne → Il se forme à l'intérieur du réservoir une atmosphère inflammable qui explose. La surpression d'explosion est telle qu'elle peut entraîner la rupture des parois du réservoir.



Agression thermique de type feu



Agression mécanique de type impact de projectile

# Exemples de scénarios entraînant l'éclatement d'un réservoir

## Sur-remplissage :

Le réservoir non protégé est connecté à un compresseur. Le compresseur s'emballe et entraîne la surpressurisation du réservoir pour atteindre la pression de résistance ultime du réservoir.

## Explosion interne :

La défaillance ou une dégradation de la membrane d'un électrolyseur entraîne la migration de l'oxygène en quantité suffisante du côté de l'hydrogène. Ce mélange hydrogène/oxygène peut se retrouver pressurisé et stocké dans un réservoir. Ce mélange peut s'enflammer à l'intérieur du réservoir (par une étincelle électrostatique, par exemple) et provoquer l'éclatement du réservoir.

Ce scénario est celui de l'accident qui s'est produit à Gangneung en Corée de sud, le 25 mai 2019.



## Fatigue :

Le non-respect des protocoles de remplissage peut entraîner la dégradation thermique interne du réservoir (pour les réservoirs de type IV notamment) et fragiliser les parois du réservoir

# Exemples de scénarios entraînant l'éclatement d'un réservoir

## Agression thermique :

- Pour les applications mobiles, on peut retrouver :
  - ✓ Feu d'un véhicule s'il s'agit de réservoirs installés dans un véhicule hydrogène ;
  - ✓ Feu de pneus, de freins ou de cabine du tracteur s'il s'agit de réservoirs installés sur un camion transportant de l'hydrogène ;
  - ✓ Feu torche d'hydrogène engendré par une fuite sur la tuyauterie de raccordement des réservoirs ;
  - ✓ Feu de matériau combustible à proximité des réservoirs d'hydrogène ;
  - ✓ Feu torche d'hydrogène engendré par une fuite sur une installation hydrogène situé à proximité du camion transportant de l'hydrogène.
- Pour les applications stationnaires, on peut retrouver :
  - ✓ Feu torche d'hydrogène engendré par une fuite sur la tuyauterie de raccordement des réservoirs ou sur une tuyauterie située à proximité du stockage ;
  - ✓ Feu de matériau combustible à proximité des réservoirs d'hydrogène (feu de nappe d'hydrocarbures sur une station multi-carburants, par exemple) ;
  - ✓ Feu torche d'hydrogène engendré par une fuite sur une installation hydrogène situé à proximité du stockage stationnaires.

# Exemples de scénarios entraînant l'éclatement d'un réservoir

## Agression mécanique :

- Pour les applications mobiles, on peut retrouver :
  - ✓ Accident de véhicule s'il s'agit de réservoirs installés dans un véhicule hydrogène ;
  - ✓ Accident entre véhicules s'il s'agit de réservoirs installés sur un camion transportant de l'hydrogène ;
  - ✓ Choc ou chute de réservoir lors de leur manutention (opérations de chargement sur le camion de transport, par exemple) ;
  - ✓ Choc par un projectile ou objet solide externe (éperonnage par les fourches d'un chariot élévateur par exemple) ;
  - ✓ Eclatement d'un réservoir adjacent (pour les cadres de bouteilles) ;
  - ✓ Explosion d'un nuage d'hydrogène se déroulant à proximité (explosion semi-confinée d'hydrogène au niveau de l'aire de dépotage délimité par la remorque du camion et les murs coupe-feu).
- Pour les applications stationnaires, on peut retrouver :
  - ✓ Choc par un projectile ou objet solide externe (éperonnage par les fourches d'un chariot élévateur par exemple) ;
  - ✓ Eclatement d'un réservoir adjacent.
  - ✓ Explosion d'un nuage d'hydrogène se déroulant à proximité.

# Conséquences d'un éclatement de réservoir d'hydrogène

Les conséquences d'un éclatement sont :

- La libération et la détente brutale du gaz contenu dans la capacité sous pression entraînant des effets de pression (onde de choc) ;
- Le mélange de l'hydrogène avec l'air formant une atmosphère inflammable ;
- La combustion de ce nuage inflammable en cas d'inflammation entraînant des effets thermiques et de surpression ;
- La projection de fragments à grandes distances.



Eclatement d'un volume de 2,4 l sous 700 bar soumis à un feu

# Conséquences d'un éclatement de réservoir d'hydrogène

L'éclatement des réservoirs métalliques ou composite entraîne la formation de 2 à 3 gros fragments.  
Cependant, l'éclatement d'un réservoir composite entraîne la dispersion d'une grande quantité de fibres de carbone.

Exemple : Eclatement d'une bouteille de 100 L sous une pression initiale de 700 bar en tunnel



Fibres de carbone dispersées



Fragment important

Exemple : Eclatements d'une bouteille de 2,4 L sous une pression initiale de 700 bar après un impact mécanique



# Conséquences d'un éclatement de réservoir d'hydrogène

Quand le réservoir est installé dans un véhicule, les dégâts peuvent être importants

Exemple : Eclatement au remplissage d'un réservoir de type IV installé dans un véhicule GNC.

Le véhicule a subi un choc à l'arrière. Le véhicule a été réparé mais les réservoirs n'ont pas été contrôlés.



<https://www.4legend.com/2019/eclatement-dune-audi-a3-g-tron-en-allemande-1-blesse-grave/>

Exemple : Essai de feu sur véhicule hydrogène sans protection.



Zalosh, R (2007). Blast waves and fireballs generated by hydrogen fuel tank rupture during fire exposure. Proceedings on the 5th Seminar on Fire and Explosion Hazard, Edinburgh, UK, 23-27 April 2007, pp. 2154-2161.

# **4. Tests réglementaires nécessaires à la mise sur le marché des réservoirs d'hydrogène**

# Tests réglementaires nécessaires à la mise sur le marché des réservoirs d'hydrogène

Avant leur mise sur le marché, les réservoirs d'hydrogène doivent subir de nombreux tests pour leur qualification avant la mise sur le marché.

Le tableau suivant présente les différents essais de qualifications selon le type de réservoirs :

Essai	Type de réservoir <sup>100</sup>			
	1	2	3	4
Épreuve d'éclatement	X	X	X	X
Épreuve de cycles de pression à température ambiante	X	X	X	X
Épreuve de comportement Fuite avant rupture (LBB)	X	X	X	X
Épreuve d'exposition au feu	X	X	X	X
Épreuve de pénétration	X	X	X	X
Épreuve d'exposition aux agents chimiques	X	X	X	X
Épreuve de tolérance aux défauts du composite		X	X	X
Épreuve de rupture accélérée sous contrainte		X	X	X
Épreuve de cycles de pression à température extrême			X	X
Épreuve de choc				X
Épreuve d'étanchéité				X
Épreuve de perméation				X
Épreuve de couple sur le bossage				X
Épreuve de cycles avec l'hydrogène gazeux				X

# Tests réglementaires nécessaires à la mise sur le marché des réservoirs d'hydrogène

Parmi les essais de qualifications, on peut retenir :

1. Épreuve d'éclatement : le but de cette épreuve est de déterminer la valeur de la pression à laquelle le réservoir éclate. Pour ce faire, le réservoir est pressurisé à une valeur donnée, qui doit être supérieure à la pression de service nominale du réservoir. La pression d'éclatement du réservoir doit dépasser une pression spécifiée. La pression d'éclatement du réservoir doit être enregistrée et conservée par le constructeur tout au long de la durée de vie utile du réservoir. La pression à laquelle le réservoir éclate est généralement égale à plus de 2,25 fois la pression de fonctionnement pour les réservoirs « routier ».

2. Épreuve de cycles de pression à température ambiante : le but de cette épreuve est de démontrer que le réservoir d'hydrogène est capable de résister à de fortes variations de pression. Pour ce faire, des cycles de pression sont appliqués au réservoir jusqu'à ce qu'une défaillance se produise ou jusqu'à ce qu'un nombre spécifié de cycles soit atteint en augmentant et en diminuant la pression jusqu'à une valeur spécifiée. Les réservoirs ne doivent pas céder avant d'avoir atteint un nombre de cycles spécifié. Le nombre de cycles jusqu'à la défaillance doit être enregistré, de même que l'endroit et la description de la défaillance. Le constructeur doit conserver les résultats tout au long de la durée de vie utile du réservoir. Les réservoirs d'hydrogène ne doivent pas présenter de défaillance avant d'avoir atteint 11 250 cycles de remplissage (ce qui représente une durée d'utilisation de 15 ans dans les véhicules utilitaires lourds).

3. Épreuve de comportement «Fuite avant rupture» (LBB) : le but de cette épreuve est de démontrer que le réservoir d'hydrogène cède par fuite avant de se rompre. Pour ce faire, des cycles de pression sont appliqués au réservoir en augmentant et en diminuant la pression jusqu'à une valeur spécifiée. Les réservoirs testés doivent soit céder par fuite, soit dépasser un nombre spécifié de cycles d'essai sans céder. Le nombre de cycles réalisés jusqu'à ce que le réservoir cède doit être enregistré, de même que l'endroit et la description de la défaillance. Le réservoir doit fuir ou doit dépasser le nombre de cycles de remplissage (11 250).

# Tests réglementaires nécessaires à la mise sur le marché des réservoirs d'hydrogène

4. Épreuve d'exposition au feu : le but de cette épreuve est de démontrer que le réservoir, avec son système de protection contre l'incendie, n'éclate pas lorsqu'il est testé dans les conditions d'incendie spécifiées. Le réservoir, pressurisé à sa pression de service, ne peut laisser échapper son contenu que par le dispositif de décompression et ne peut pas se rompre.

5. Épreuve de pénétration : le but de cette épreuve est de démontrer que le réservoir ne se rompt pas lorsqu'il est pénétré par une balle. Pour ce faire, le réservoir complet, avec son enveloppe protectrice, est pressurisé et percé d'une balle. Le réservoir ne peut pas se rompre.

6. Épreuve de tolérance aux défauts du composite : le but de cette épreuve est de démontrer que le réservoir d'hydrogène est capable de résister à des pressions élevées. Pour ce faire, des entailles d'une géométrie spécifiée sont faites dans la paroi du réservoir et un nombre spécifié de cycles de pression est appliqué. Le réservoir ne peut pas fuir ou se rompre pendant un certain nombre de cycles, mais peut céder par fuite durant les cycles d'essai restants. Le nombre de cycles jusqu'à ce que le réservoir cède doit être enregistré, de même que l'endroit et la description de la défaillance.

7. Épreuve de rupture accélérée sous contrainte : le but de cette épreuve est de démontrer que le réservoir d'hydrogène est capable de résister à une pression élevée et à des températures élevées à la limite de la plage de fonctionnement admissible pendant une période prolongée. Pour ce faire, le réservoir est exposé pendant un temps spécifié à des conditions de pression et de température spécifiées puis soumis à l'épreuve d'éclatement (cf transparent 23). Le réservoir doit atteindre une pression d'éclatement spécifiée.

# Tests réglementaires nécessaires à la mise sur le marché des réservoirs d'hydrogène

8. Épreuve de choc : le but de cette épreuve est de démontrer que le réservoir d'hydrogène reste opérationnel après avoir été soumis aux impacts mécaniques spécifiés. Pour ce faire, le réservoir est soumis à une épreuve de chute et à un nombre spécifié de cycles de pression. Le réservoir ne peut pas fuir ou se rompre pendant un nombre spécifié de cycles, mais peut céder par fuite durant les cycles d'essai restants.

9. Épreuve de cycles de pression à température extrême : le but de cette épreuve est de démontrer que le réservoir d'hydrogène peut résister à des variations de pression dans différentes conditions de température. Pour ce faire, le réservoir, dégagé de toute enveloppe protectrice, est soumis à une épreuve hydrostatique de cycles en étant exposé à des conditions ambiantes extrêmes avant de subir l'épreuve d'éclatement et l'épreuve d'étanchéité visées aux points 1) et 10). Les réservoirs soumis à ces cycles ne peuvent pas présenter de signes de rupture, de fuite ou d'effilochage des fibres. Les réservoirs ne peuvent pas éclater à une pression spécifiée.

10. Épreuve d'étanchéité : le but de cette épreuve est de démontrer que le réservoir d'hydrogène ne présente pas de signe de fuite dans les conditions spécifiées. Pour ce faire, le réservoir est pressurisé à sa pression de service nominale. Aucun signe de fuite par des fissures, des pores ou des défauts similaires ne peut être détecté.

# Tests réglementaires nécessaires à la mise sur le marché des réservoirs d'hydrogène

11. Épreuve de cycles avec l'hydrogène gazeux : le but de cette épreuve est de démontrer que le réservoir d'hydrogène est capable de résister à de fortes variations de pression lorsque de l'hydrogène gazeux est utilisé. Pour ce faire, le réservoir est soumis à un certain nombre de cycles de pression en utilisant de l'hydrogène gazeux et à l'épreuve d'étanchéité visée au point 10). Les détériorations, notamment les fissures d'usure ou la décharge électrostatique du réservoir, sont inspectées. Le réservoir doit satisfaire aux exigences de l'épreuve d'étanchéité. Le réservoir doit être exempt de toute détérioration, notamment de fissures d'usure ou de décharge électrostatique.

# Détails de certains tests réglementaires nécessaires à la mise sur le marché des réservoirs d'hydrogène

## 4. Épreuve d'exposition au feu appelé « flamme vive » :

Ces essais sont normalisés à travers l'essai « bonfire » prescrit par différentes normes et règlements.

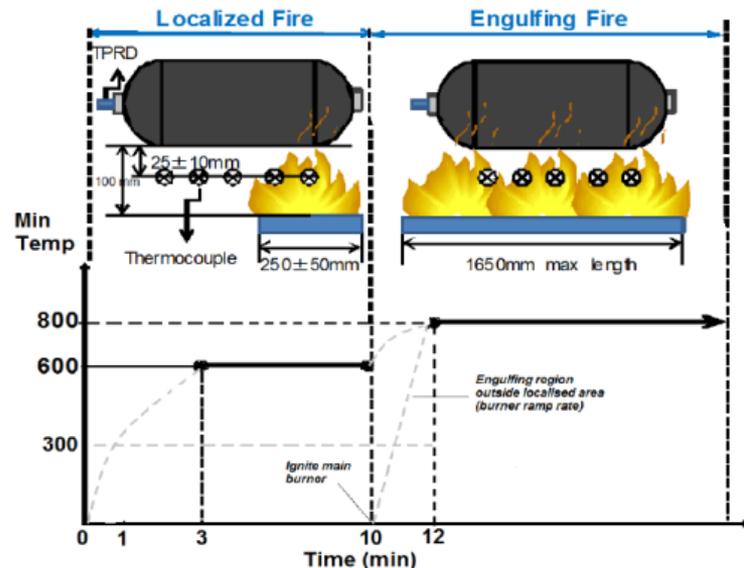
Il est réalisé sur le réservoir muni de ses accessoires de sécurité rempli d'hydrogène à 100 % de sa pression nominale de service. L'essai vise à démontrer que le réservoir exposé à un feu ne va pas éclater et que le TPRD (dispositif de décompression activé par la chaleur) va correctement se déclencher et évacuer la pression.

L'essai se déroule en deux phases : une première phase d'exposition à un feu localisé au plus loin du TPRD et et une seconde phase de feu enveloppant. La durée totale de l'essai dure 12 min.

Les règlements techniques mondiaux relatif au véhicule routier ne prévoient pas d'essais à la flamme vive pour les réservoirs non équipés de dispositifs de décompression thermique, alors que cela pourrait fournir des informations utiles sur le degré de résistance au feu de ces réservoirs.

Seule la norme EN 12245 relative aux réservoirs transportables impose que :

- Pour une bouteille sans TPRD < 150 l, le réservoir doit tenir au feu 2 min sans éclater.
- Pour une bouteille sans TPRD > 150 l, le réservoir doit tenir au feu 2 min sans éclater.
- Pour les bouteilles équipées d'un TPRD, elles ne doivent pas rompre dans les 2 à 5 min.



# Détails de certains tests réglementaires nécessaires à la mise sur le marché des réservoirs d'hydrogène

## 5. Épreuve de pénétration :

Le réservoir est pressurisé initialement à 10 bar.

Le réservoir ne doit pas éclater (il peut fuir) :

- Lorsqu'une balle perforante ou un élément de frappe d'un diamètre supérieur ou égal à 7,62 mm pénètre entièrement dans sa paroi à une vitesse nominale de 850 m/s.
- Lorsque un projectile d'une dureté minimum de 870 Hv d'un diamètre compris entre 6,08 et 7,62 mm d'une masse comprise entre 3,8 et 9,75 g d'une forme conique avec un angle au sommet de 45° animé d'une vitesse nominale de 850 m/s impacte le réservoir avec une énergie minimale de 3300 J.

## 8. Épreuve de choc :

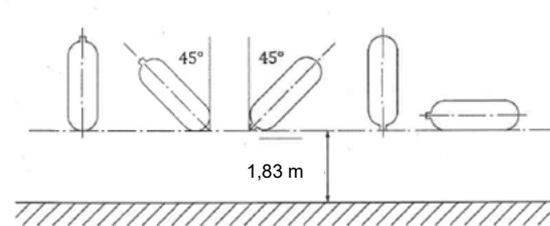
Il s'agit d'un test de chute du réservoir d'une hauteur de 1,83 m sur une surface de type béton.

Les réservoirs doivent chuter :

- en position horizontale,
- en position verticale,
- à 45° par rapport à l'horizontale sur l'extrémité du réservoir.

Ensuite, les réservoirs sont cyclés en pression de 20 bar à 125 % de la pression nominale de service 750 à 1125 fois selon le type de réservoir.

Crash-test : Un essai de crash-test est requis lorsqu'un réservoir d'hydrogène est installé dans un véhicule. La vitesse est de l'ordre de 50 km/h. L'analyse post-essai indique que le réservoir doit maintenir sa pression nominale de service pendant 1h.



# 5. Comportement des réservoirs aux agressions thermiques

# Comportement des bouteilles métalliques de type I au feu

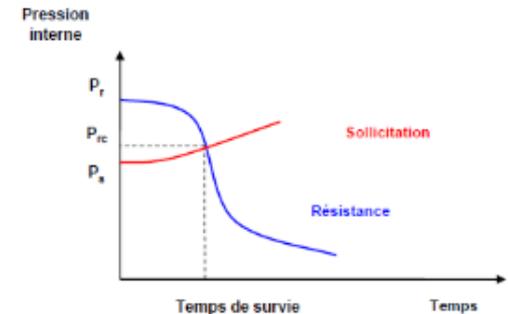
Le temps de survie du réservoir non protégé est généralement piloté par la perte de résistance de l'enveloppe (quelques minutes).

Pour des agressions de type jet enflammé :

- La fragilisation est localisée au niveau du point d'impact du jet enflammé sur le réservoir ;
- La fragilisation de l'enveloppe est rapide (dilatation contrariée et flambement local) ;
- Les échanges thermiques avec l'H<sub>2</sub> sont limités, ce qui limite la montée en pression interne en raison du peu de chaleur absorbée par le contenant ;
- La pression de rupture est proche de la pression de service.

Pour des agressions de type feu englobant :

- La rupture de l'enveloppe peut être tardive. Le flux thermique est moins intense et réparti sur l'ensemble de la surface du réservoir ;
- La montée en pression interne est généralement plus importante que pour un feu localisé ;
- La pression de rupture peut être évaluée par un calcul de transfert thermique combinant l'enveloppe et le contenant.



# Comportement des réservoirs métalliques de type II au feu

Les réservoirs de type II sont métalliques munies d'un renfort circonférentiel en fibre composite (carbone-résine). Les extrémités des réservoirs sont généralement libres de renfort.

Le comportement aux agressions thermiques de ces réservoirs est généralement assimilé aux réservoirs de type I.

L'analyse de la littérature scientifique ouverte n'a pas permis d'identifier de travaux spécifiques sur ce type de réservoir.

Cependant, l'ajout du renfort de la fibre de carbone peut modifier le comportement du réservoir.

- Pour un feu englobant, on peut penser que les extrémités des réservoirs vont conduire la chaleur. Ainsi, le comportement thermique du réservoir peut s'apparenter à celui d'un réservoir de type I tel que décrit au transparent précédent. Cependant, le renfort composite entraîne une augmentation de la résistance mécanique du réservoir.
- Pour un feu partiel sur une extrémité du réservoir, on peut penser que le comportement thermique du réservoir peut s'apparenter à celui d'un réservoir de type I.
- Lorsque cette agression a lieu sur la partie centrale du réservoir, l'ajout du renfort doit modifier le comportement thermique du réservoir (étant donné que la fibre de carbone conduit mal la chaleur) modifiant ainsi sa résistance mécanique à ce type d'agressions.

# Comportement des réservoirs métalliques de type III au feu

Zalosh (2007) a réalisé une campagne d'essais spécifiques sur les réservoirs composites notamment de type III.

Un réservoir de type III (d'une capacité de 88 litres) a été placé sous un véhicule utilitaire sport (SUV) classique, à 28 cm au-dessus du sol avec une pression initiale de 318 bar.

Le temps de défaillance suite au début de l'incendie (c'est-à-dire la résistance au feu) s'est élevé à 12 minutes et 18 secondes pour le réservoir de type III.

Les pressions maximales mesurées sont de 1,40 bar à 1,2 m et 120 mbar à 15 m.

La taille de la boule de feu produite est de 24 m de diamètre pour le réservoir de type III. La boule de feu s'élève en 1 seconde. La durée d'une boule de feu était d'environ 4,5 secondes.

Les valeurs maximales du flux thermique mesurées à une distance de 15,2 m sont comprises entre 210 et 300 kW/m<sup>2</sup>.

Dans le cas de l'essai du réservoir de type III (essai SUV), un gros fragment de réservoir a été retrouvé à 41 m du SUV. Des fragments de SUV ont été retrouvés à une distance maximale de 107 m.

Type 3 under SUV



# Comportement des réservoirs métalliques de type III au feu

Tamura et al (2019) ont réalisé une campagne d'essais sur les réservoirs composites de type III sans protection.

Ils ont exposé des réservoirs de type III à des deux feux localisés et englobants pour déterminer leur résistance produit par un brûleur propane. La publication indique que le flux thermique reçu est compris entre 251 et 419 kW/m<sup>2</sup>.

Ils ont tout d'abord déterminé la pression de ruine ultime des réservoirs sans agression thermique ( $P_{new}$ ). Puis, ils ont soumis le réservoir de même caractéristique à une agression thermique (partiel ou englobant) pour déterminer sa pression d'éclatement ( $P_{burst1}$ ). Enfin, le réservoir de même caractéristique a été soumis à la même agression thermique mais le feu a été éteint juste avant l'éclatement, le réservoir a été refroidi (naturellement ou par aspersion d'eau). Puis, le réservoir a été repressurisé pour déterminer sa pression de ruine ultime ( $P_{burst2}$ ) après agression thermique.

Cela a été fait pour des pressions de 200, 350 et 700 bar pour différentes pressions de service de réservoirs de type III.

Le volume des réservoirs n'est pas spécifiquement précisé dans la publication, mais il peut être estimé au moyen des photos et des schémas à 140 litres.

L'ensemble des essais a conduit à l'éclatement des réservoirs.

# Comportement des réservoirs métalliques de type III au feu

Les résultats sont regroupés au tableau suivant :

Pression de service du réservoir (bar)	Pression initiale $P_{fill}$ (bar)	Pression de résistance ultime $P_{new}$ (bar)	Ratio $P_{new} / P_{fill}$	Type de feu	Pression d'éclatement $P_{burst1}$ (bar)	Temps d'éclatement (s)	Ratio $P_{burst1} / P_{fill}$	Pression de résistance ultime après agression thermique $P_{burst2}$ (bar)	Ratio $P_{burst2} / P_{fill}$	Ratio $P_{burst2} / P_{few}$
200	200	917	4,6	Englobant	312	509 s	1,56	842	4,21	0,92
	200		4,6	Localisé	318	659 s	1,53	827	4,13	0,92
350	350	1228	3,5	Englobant	535	1006 s	1,53	1111	3,17	0,9
700	350	2268	6,5	Englobant	645	1959 s	1,84	1930	5,51	0,85
	700		3,25	Englobant	989	929 s	1,48	1975	2,82	0,87

# Comportement des réservoirs métalliques de type III au feu

On constate que :

- L'ensemble des essais a conduit à l'éclatement des réservoirs de type III ;
- Lorsque le réservoir est pressurisé à sa pression de service, la pression d'éclatement dans le réservoir soumis à un feu augmente d'un facteur de l'ordre de 1,5 ;
- La pression ultime de ruine d'un réservoir avec agression thermique est diminuée d'un facteur 0,9 par rapport au cas sans agression thermique ;
- Le feu localisé et le feu englobant ont peu d'influence sur la tenue mécanique du réservoir hormis sur le temps de résistance qui est plus bas pour un feu englobant ;
- Pour une pression de service de 200 bar, le temps de résistance au feu est de l'ordre 10 min. Pour les pressions supérieures, lorsque le réservoir est à sa pression de service, le temps de résistance est de l'ordre de 15 min. Ce temps peut être augmenté si la pression à laquelle est remplie le réservoir est très inférieure à sa pression nominale de service. La différence de temps de résistance observée entre une pression de service à 200 bar et des pressions supérieures provient de l'épaisseur de la coque de matériau composite. Etant plus épaisse, elle se dégrade moins rapidement et résiste donc plus longtemps (ce qui a été confirmé par Wang et al (2023)) ;
- Des ruptures superficielles de fibres ont été constaté lorsque le feu a été éteint.



35MPa Type3,  $P_{ov}$  35MPa, Engulfing fire, Water cooling Test#10



35MPa Type3,  $P_{ov}$  35MPa, Engulfing fire, Natural cooling Test#11

# Comportement des réservoirs métalliques de type III au feu

Le mécanisme physique conduisant à l'éclatement des réservoirs de type III pourrait être le suivant :

- La paroi composite du réservoir est un matériau hétérogène de fibre de carbone coulé dans la résine. Le liner métallique assure l'étanchéité à l'hydrogène. La coque de matériau composite supporte la pression interne de l'hydrogène.
- En cas d'agression thermique de type feu, la résine du composite se dégrade et les plis de fibres se détachent là où la résine est décomposée. Ainsi, la perte de cohésion des fibres entre elle ne leur permet plus de supporter la pression de l'hydrogène.
- Le front de dégradation de la résine se propage de l'extérieur vers l'intérieur de la paroi. La pression à l'intérieur du réservoir augmente avec le temps en raison transfert de chaleur de l'incendie à travers la paroi et le liner métallique vers l'hydrogène d'un facteur 1,5.
- Le facteur de sécurité réglementaire pour la pression d'éclatement est de 2,25 de la pression nominale de service (PSN), c'est-à-dire que seule 44 % (1/2,25) de l'épaisseur de la paroi peut supporter la pression nominale de service. Lorsque l'épaisseur de la paroi où la cohésion entre les fibres n'est plus suffisante, c'est-à-dire inférieur à 44% de l'épaisseur initiale du réservoir, le réservoir éclate.

# Comportement des réservoirs composites de type IV au feu

Zalosh (2007) a réalisé une campagne d'essais spécifiques sur les réservoirs composites notamment de type IV.

Un réservoir de type III (d'une capacité de 72,4 litres et présentant les dimensions suivantes :  $L \times l = 0,81 \text{ m} \times 0,41 \text{ m}$ ) avec une pression initiale de 35 bar.

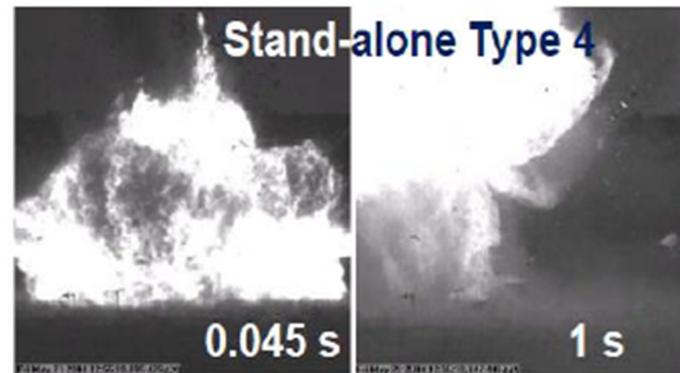
Le temps de défaillance suite au début de l'incendie (c'est-à-dire la résistance au feu) s'est élevé à 6 minutes et 27 secondes pour le réservoir de type IV.

Les pressions maximales mesurées sont de 3 bar à 1,9 m et 410 mbar à 6,5 m.

La taille de la boule de feu produite est de 7,7 m de diamètre pour le réservoir de type IV. La boule de feu s'élève en 1 seconde. La durée d'une boule de feu était d'environ 4,5 secondes.

Les valeurs maximales du flux thermique mesurées à une distance de 15,2 m sont comprises entre 210 et 300 kW/m<sup>2</sup>.

Dans le cas de l'essai du réservoir de type IV, un gros fragment de réservoir de 14 kg a été retrouvé à 82 du lieu de l'incendie.



# Comportement des réservoirs métalliques de type IV au feu

L'Ineris a grandement contribué à l'étude du comportement de ce type de réservoir aux agressions thermiques au travers :

- du projet ANR Hype ;
- du projet Oseo H2E Horizon Hydrogen Energie (Ruban et al. 2012) ;
- Des projets européens Hyper et Firecomp (Blanc-Vannet et al. 2017).

Les travaux menés par Ruban et al. se sont concentrés sur les effets du feu sur les réservoirs composites destinés au stockage de l'hydrogène de type IV.

L'objectif de cette étude était d'étudier le comportement d'un cylindre composite non protégé face à un feu de nappe d'heptane (localisé ou englobant) afin de concevoir une protection appropriée et de réduire la longueur de toute flamme d'hydrogène potentielle.

Plusieurs essais ont été réalisés sur des réservoirs de 2,4, 36 L et 100 litres à des pressions comprise entre 175 et 700 bar.

Le temps écoulé entre l'exposition au feu et l'éclatement (ou la fuite) du cylindre a été mesuré.



Bouteille de 100 l dans un feu

# Comportement des réservoirs métalliques de type IV au feu

Les résultats sont regroupés au tableau suivant pour les réservoirs de 2,4 litres :

Pression initiale	Caractéristiques du feu	Eclatement ou fuite	Pression avant l'ouverture	Temps d'ouverture
3 bar	Feu englobant	Fuite	8 bar	550 s
100 bar	Feu englobant	Fuite	150 bar	300 s
350 bar	Feu englobant	Fuite	450 bar	270 s
435 bar	Feu englobant	Fuite	520 bar	270 s
480 bar	Feu englobant	Eclatement	600 bar	325 s
525 bar	Feu englobant	Eclatement	675 bar	245 s
700 bar	Feu englobant	Eclatement	830 bar	230 s

On constate qu'il y a des situations pour lesquelles les réservoirs fuient mais n'éclatent pas.

# Comportement des réservoirs métalliques de type IV au feu

Les résultats sont regroupés au tableau suivant pour les réservoirs de 36 litres :

Pression initiale	Caractéristiques du feu	Eclatement ou fuite	Pression avant l'ouverture	Temps d'ouverture
178 bar	Feu englobant	Fuite	204 bar	665 s
356 bar	Feu englobant	Eclatement	379 bar	590 s
703 bar	Feu englobant	Eclatement	703 bar	392 s
706 bar	Feu partiel	Eclatement	706 bar	320 s

Comme pour les réservoirs de 2,4 litres, on constate qu'il y a des situations pour lesquelles les réservoirs fuient mais n'éclatent pas.



Feu englobant



Feu partiel

# Comportement des réservoirs métalliques de type IV au feu

Les résultats sont regroupés au tableau suivant pour les réservoirs de 100 litres :

Pression initiale	Caractéristiques du feu	Eclatement ou fuite	Pression avant l'ouverture	Temps d'ouverture
175 bar	Feu englobant	Fuite	213 bar	642 s
350 bar	Feu englobant	Fuite	396 bar	577 s
525 bar	Feu englobant	Eclatement	544 bar	430 s
703 bar	Feu englobant	Eclatement	715bar	353 s

Comme pour les réservoirs de 2,4 et 36 litres, on constate qu'il y a des situations pour lesquelles les réservoirs fuient mais n'éclatent pas.

# Comportement des réservoirs métalliques de type IV au feu

Principaux enseignements :

- Pour les volumes importants, la pression dans le réservoir augmente très peu avant l'éclatement ( $P_{\text{init}} = 700 \text{ bar}$ ,  $P_{\text{final}} = 715 \text{ bar}$ ). Ceci montre la forte inertie thermique du matériau composite.
- Un feu partiel peut entraîner un éclatement au même titre qu'un feu englobant.
- Il semble y avoir un délai de l'ordre de 5 min avant l'éclatement pour les volumes les plus importants.
- Il existe des situations pour lesquelles le réservoir n'éclate pas. Ces situations dépendent du volume du réservoir et surtout de la pression initiale.

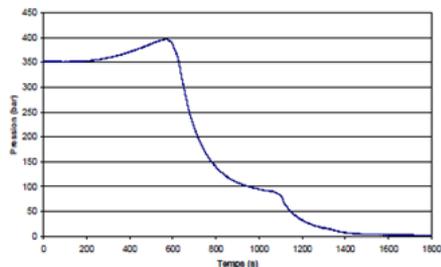
# Comportement des réservoirs métalliques de type IV au feu

Dans les situations de non-éclatement :

- L'analyse interne des réservoirs de type IV montre que le liner a fondu et coulé le long de la paroi interne de la bouteille, laissant apparaître par endroits la fibre de carbone, et entraînant un dépôt de matière sur la partie inférieure. Cela entraîne des fuites réparties à travers les fibres de carbone.
- L'onde de chaleur s'est propagée dans la paroi du réservoir venant dégrader le liner polymère. Les fibres de carbone ont permis de garder la cohésion mécanique du réservoir malgré la dégradation de la résine.



Fuite à travers les fibres de carbone



Fonte du liner polymère

Impact de goutte de liner fondu



Intérieur de la bouteille

# Comportement des réservoirs métalliques de type IV au feu

Les travaux de Blanc-Vannet et al. réalisés dans le cadre du projet européen FIRECOMP confirment les tendances présentées précédemment :

- Les réservoirs utilisés sont des réservoirs de 36 litres.
- L'agression thermique est produite par des jets enflammés d'hydrogène.
- Les principaux résultats sont présentés au tableau suivant :

Pression initiale	Caractéristiques du feu	Eclatement ou fuite	Pression avant l'ouverture	Temps d'ouverture
100 bar	Feu englobant	Fuite	135 bar	490 s
250 bar	Feu englobant	Fuite	305 bar	480 s
525 bar	Feu englobant	Eclatement	565 bar	311 s
700 bar	Feu englobant	Eclatement	715 bar	238 s

# Comportement des réservoirs métalliques de type IV au feu

L'intérêt des travaux du projet Firecomp est d'avoir mesuré les flux reçus par un réservoir composite de type IV afin de caractériser au mieux l'agression thermique.

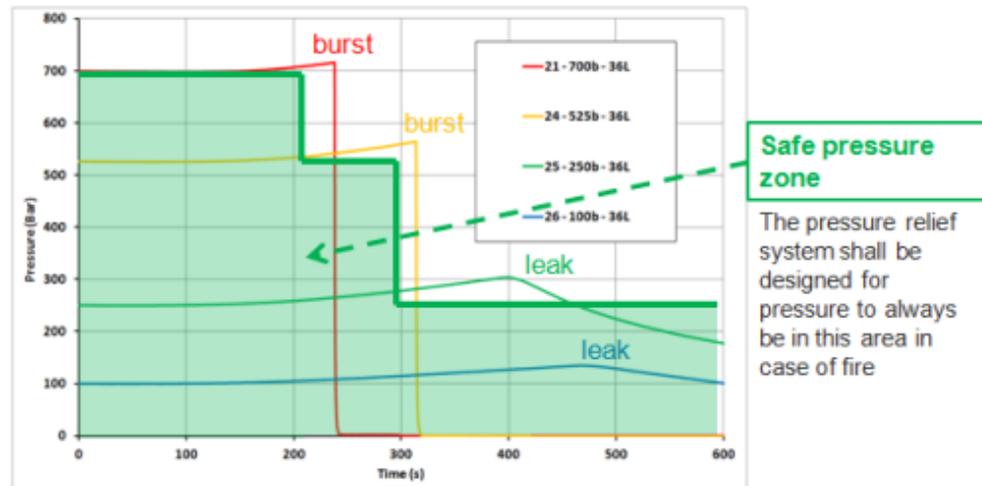
L'analyse faite des essais a permis de relier le flux thermique reçu par le réservoir et le temps avant l'éclatement en supposant que le réservoir n'est pas protégé.

Le tableau suivant présente un exemple de résultats suivant différentes situations de feu.

Type de phénomène	Flux reçu [kW/m <sup>2</sup> ]	Délai avant éclatement [min]
Agression par une flamme de prémélange H <sub>2</sub> /O <sub>2</sub>	100 kW/m <sup>2</sup>	4 min
Feu englobant, valeur haute	50 kW/m <sup>2</sup>	8 min
Feu englobant, valeur basse	20 kW/m <sup>2</sup>	20 min
Feu distant : bouteille non soumise directement aux flammes	10 kW/m <sup>2</sup>	40 min

# Comportement des réservoirs métalliques de type IV au feu

Ils ont permis également d'établir des préconisations quant aux performances de barrières de protections et leur fonctionnement comme les dispositifs de dépressurisation de type TPRD ou les écrans thermiques. Cela permet de s'assurer que la bouteille est maintenue dans une zone de pression en fonction du temps dans laquelle aucun éclatement ne se produit.



Halm, D., Fouillen, F., Lainé, E., Gueguen, M., Bertheau, D., van Eelkelen, Composite pressure vessels for hydrogen storage in fire conditions: fire tests and burst simulation, Int. J. of Hydrogen Energy, vol 42, 2017.

# Comportement des réservoirs métalliques de type IV au feu

Les travaux plus récents de Tamura et al (2019) ont également porté sur des réservoirs composites de type IV sans protection.

Les réservoirs de type IV sont exposés à un flux thermique compris entre 251 et 419 kW/m<sup>2</sup> produit par un brûleur propane.

La démarche expérimentale est identique à celle présentée au transparent 31.

Les résultats sont regroupés au tableau suivant :

L'essai à la pression initiale de 350 bar n'a pas abouti à un éclatement mais à une fuite.

Pression de service du réservoir (bar)	Pression initiale P <sub>fill</sub> (bar)	Pression de résistance ultime P <sub>new</sub> (bar)	Ratio P <sub>new</sub> / P <sub>fill</sub>	Type de feu	Pression avant ouverture P <sub>burst1</sub> (bar)	Temps avant ouverture (s)	Ratio P <sub>burst1</sub> / P <sub>fill</sub>	Pression de résistance ultime après agression thermique P <sub>burst2</sub> (bar)	Ratio P <sub>burst2</sub> / P <sub>fill</sub>	Ratio P <sub>burst2</sub> / P <sub>few</sub>
250	250	1231	4,9	Englobant	284	550 s	1,14	790	4,21	0,92
700	350	1868	5,33	Englobant	431	800 s	1,23	1734	5,51	0,94
	700		2,67	Englobant	777	906 s	1,11	1884	2,82	1

# Comportement des réservoirs métalliques de type III au feu

Les résultats de Tamura confirment les tendances des essais H2E et FIRECOMP pour lesquelles il existe des pressions en dessous desquelles le réservoir fuit mais n'éclate pas.

Cependant, les travaux de Tamura et al montre que le temps de résistance mécanique est 3 fois supérieurs à ceux observés dans les projets H2E et FIRECOMP.

Cette différence importante est-elle due :

- aux différentes importantes qu'il y a entre un feu de nappe d'heptane, un feu d'hydrogène et un brûleur à gaz ;
- aux différentes constitutions du réservoir comme la nature de la résine ;
- aux différents volumes du réservoir.

# Comportement des réservoirs métalliques de type IV au feu

Le mécanisme physique conduisant à l'éclatement des réservoirs de type IV est similaire à celui du type III :

- La paroi composite du réservoir est matériau hétérogène de fibre de carbone coulé dans la résine. Le liner polymère assure l'étanchéité à l'hydrogène. La coque de matériau composite supporte la pression interne de l'hydrogène.
- En cas d'agression thermique de type feu, la résine du composite se dégrade et les plis de fibres se détachent là où la résine est décomposée. Ainsi, la perte de cohésion des fibres entre elle ne leur permet plus de supporter la pression de l'hydrogène.
- Le front de dégradation de la résine se propage de l'extérieur vers l'intérieur de la paroi. La pression à l'intérieur du réservoir augmente avec le temps en raison transfert de chaleur de l'incendie à travers la paroi et le liner métallique vers l'hydrogène d'un facteur 1,5.
- Le facteur de sécurité réglementaire pour la pression d'éclatement est de 2,25 de la pression nominale de service (PSN), c'est-à-dire que seule 44 % (1/2,25) de l'épaisseur de la paroi peut supporter la pression nominale de service. Lorsque l'épaisseur de la paroi où la cohésion entre les fibres n'est plus suffisante, c'est-à-dire inférieur à 44% de l'épaisseur initiale du réservoir, le réservoir éclate.
- Cependant, à la différence des réservoirs de type III, il y a des cas pour lesquels le réservoir n'explose pas mais fuit. Ce mécanisme est appelé leak before burst. Il apparait ainsi que le liner polymère fond avant l'épaisseur critique de la coque composite ne soit atteinte. Ce mécanisme se manifeste pour des pressions de remplissage ou résiduel dans le réservoir très inférieures à la pression nominale de service de l'ordre d'un facteur 2 à 3.

# Comportement des réservoirs d'hydrogène aux agressions thermiques

L'ensemble de ces travaux montre que selon le type de réservoir leur tenue mécanique aux agressions thermiques est différente selon les sollicitations.

Sans protection, les agressions thermiques sur des réservoirs à base métallique de type I, II et III (liner métallique) conduiront à l'éclatement. Les agressions thermiques sur des réservoirs de type IV (liner polymère) conduiront à l'éclatement pour des pressions proches des pressions nominales de service. Mais pour des pressions de remplissage plus faible d'un facteur 2 à 3, le réservoir fuirait sans éclater.

Les temps les plus pénalisants de tenues mécaniques sont de l'ordre de 5 min (même si des temps plus importants ont été enregistrés pour les essais de Tamura).

Pour les réservoirs de type III, la pression dans le réservoir soumis à son agression thermique semble augmenter d'un facteur 1,5 alors que pour les bouteilles de type IV, la pression au moment de l'éclatement reste assez proche de la pression nominale de service. Cette remarque montre que la protection des réservoirs contre l'éclatement par une soupape pourrait être efficace pour les réservoirs de type I, II et potentiellement III. Mais, cela s'avérerait inefficace pour les réservoirs de type IV.

# Comportement des réservoirs d'hydrogène aux agressions thermiques

Le comportement de réservoirs pris unitairement apparaît plutôt bien connu et qualifié par un test standard du réservoir et de sa protection. Cependant, aucun test réglementaire n'est prévu pour déterminer la tenue ultime des réservoirs (ce que regrette les services de secours) et son temps de résistance.

De plus, aucun travail n'a été réalisé lorsque les réservoirs sont assemblés (en cadre notamment). En effet, il est possible de retrouver connectés 10 réservoirs ou plus sur une même sortie (vidange et/ou TPRD). Indépendamment des aspects « tenue du réservoir aux agressions thermiques », on peut se poser la question de la résistance mécanique des supportages des réservoirs à ces agressions thermiques et du comportement des réservoirs et de leur connectique si les supportages venaient à flamber.

# 6. Comportement des réservoirs aux agressions mécaniques

# Comportement des réservoirs d'hydrogène aux agressions mécaniques

Parmi les agressions mécaniques qu'un réservoir d'hydrogène peut rencontrer, on trouve :

- les impacts de projectile ;
- les chocs avec des objets ;
- la chute du réservoir ;
- l'écrasement du réservoir ;
- l'interaction du réservoir avec une onde de pression (onde de choc notamment).

# Comportement des réservoirs d'hydrogène de type I et II aux agressions mécaniques

## Réservoir de type I :

Le comportement mécanique des réservoirs métalliques de type I à l'ensemble de ces sollicitations est bien caractérisé et a fait l'objet de travaux approfondis depuis de nombreuses années. Parmi ces travaux, on peut citer les travaux de Le-Roux (2018) sur les impacts de projectiles d'origine accidentelle sur les parois métalliques ou les travaux de Noret (2012) sur l'interaction des ondes de pression sur les structures métalliques.

De plus, les outils de modélisation de comportement mécanique de type éléments finis pour les matériaux homogènes comme les matériaux métalliques constitutifs des parois des réservoirs sont de plus en plus fiables et peuvent permettre une étude approfondie du comportement des réservoirs de type I pour les agressions mécaniques identifiées.

## Réservoir de type II :

Même si les réservoirs de type II sont souvent considérés comme des réservoirs métalliques L'ajout circonférentiel de fibres de carbone peut modifier le comportement des parois du réservoir aux agressions mécaniques externes. Même si ce type de réservoir fait l'objet de 2 tests de standards de pénétration par un projectile calibré à 850 m/s ou d'essais de chute à 1,83 m de hauteur, cela ne permet pas de couvrir l'ensemble des agressions possible. En effet, on peut, par exemple, se poser la question de la pénétration d'un projectile d'origine accidentelle dans la couche de fibre de carbone et dans la paroi métallique du réservoir.

La littérature scientifique ouverte ne fait pas état de travaux spécifiques sur le comportement mécanique aux agressions mécaniques pour les réservoirs de type II.

B. Le-Roux, Rapport N° DRA-18-171603-02573A : Résistance des structures industrielles à l'impact de projectiles d'origine accidentelle OMEGA 23 disponible sur [www.ineris.fr](http://www.ineris.fr)

E. Noret, Gaétan Prod'Homme, Thierry Yalamas, Mathieu Reimeringer, Jean-Luc Hanus, et al.. Safety of atmospheric storage tanks during accidental explosions. European Journal of Environmental and Civil Engineering, 2012, 16 (9), pp.998-1022.

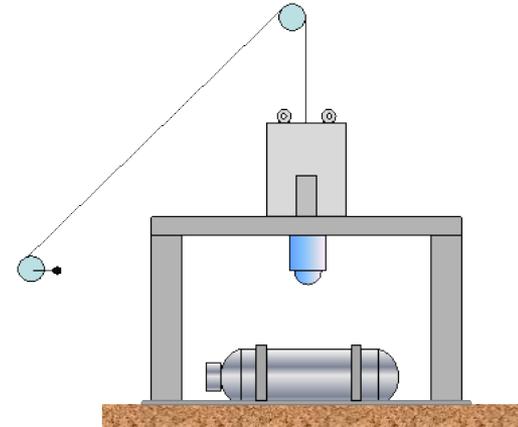
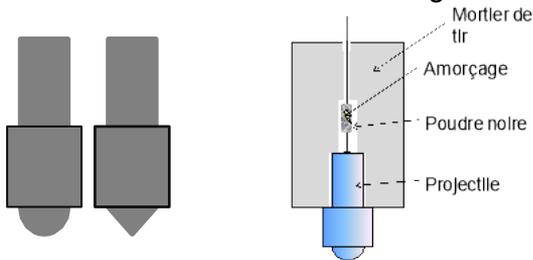
# Comportement des réservoirs d'hydrogène de type III et VI aux agressions mécaniques

Les réservoirs composites de type III et IV ont fait l'objet de travaux spécifiques aux impacts mécaniques.

L'Ineris a contribué aux développements de la connaissance du comportement de ces réservoirs dans le cadre du projet H2E.

Dans le cadre de ce projet, l'Ineris a réalisé sur des réservoirs composites la projection de projectiles :

- de 2,4 et 100 litres ;
- de forme hémisphérique ou angulaire ;
- de différentes masses sur des réservoirs d'hydrogène : 3, 20 et 100 kg ;
- à des vitesses de projection entre 3 et 80 m/s ;
- pour des pressions initiales de 100, 350 et 700 bar ;
- Les essais ont été réalisés dans les galeries de l'Ineris.



# Comportement des réservoirs d'hydrogène de type III et VI aux agressions mécaniques

Essais sur réservoirs de 2,4 litres pressurisés initialement à 700 bar :

- Essai – Impacteur angulaire de 20 kg – Vitesse de projection : 21 m/s → Energie : 4410 J



Longueur de la zone impactée : 80mm  
Largeur de la zone impactée : 45 mm  
Profondeur de pénétration : 3-4 mm

- Essai – Impacteur angulaire de 20 kg – Vitesse de projection : 15 m/s → Energie : 2250 J



Réservoir éventré en un seul morceau  
Eclatement environ 2 s après l'impact

- Essai – Impacteur angulaire de 20 kg – Vitesse de projection : 25,5 m/s → Energie : 6650 J



Bouteille éventrée en deux morceaux

# Comportement des réservoirs d'hydrogène de type III et VI aux agressions mécaniques

Essais sur réservoirs de 100 litres pressurisés initialement à 700 bar :

- Impact avec le projectile de 100 kg angulaire à 13 m/s (8450 J) → Pas d'éclatement



- Impact avec un projectile de 20 kg angulaire à 29 m/s (8450 J) → Pas d'éclatement



# Comportement des réservoirs d'hydrogène de type III et IV aux agressions mécaniques

L'ensemble des travaux de l'Ineris montre que :

- Les essais réalisés ont mis en évidence que l'énergie cinétique à l'impact ne semblait pas être le seul paramètre déterminant sur le comportement mécanique des bouteilles. En effet, certaines bouteilles ont supporté des énergies d'impact de l'ordre de 5000 J, d'autres ont éclaté avec des énergies d'impact de l'ordre de 2500 J.
- Le comportement mécanique des réservoirs de type IV pressurisés semble difficilement reproductible et prédictible.
- Sur les quelques essais réalisés sur bouteille de 100 L, il semblerait que ces dernières offrent une meilleure résistance à l'impact que les 2,4 L.

# Comportement des réservoirs d'hydrogène de type III et VI aux agressions mécaniques

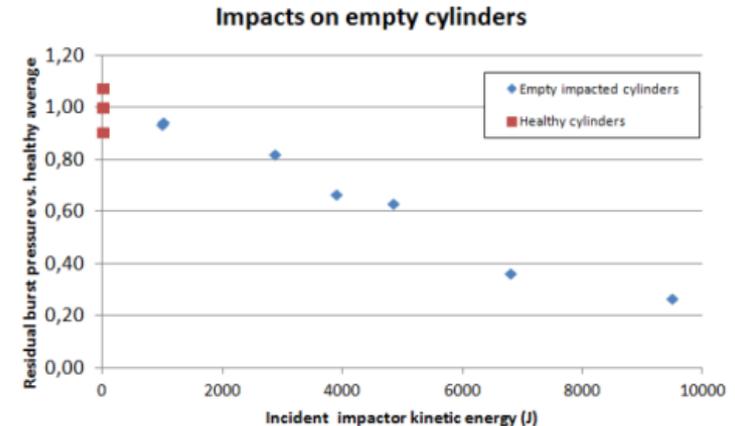
La caractérisation du comportement mécanique des réservoirs composites aux impacts mécaniques a continué lors du projet européen HYPACTOR.

Blanc-Vannet (2017) a réalisé des impacts sur des réservoirs composites de type IV d'un volume de 36 litres. Comme constaté précédemment par l'Ineris, les impacts directs de projectiles jusqu'à des énergies cinétiques de 10000 J n'entraîne pas l'éclatement des réservoirs.

Il a ensuite cherché à quantifier la pression de ruine ultime des réservoirs impactés en les pressurant jusqu'à l'éclatement et la comparer la pression de ruine ultime de réservoir non-impacté.

Blanc-Vannet (2017) montre que la résistance mécanique résiduel des réservoirs composites diminue significativement après avoir été impactés mécaniquement.

On peut estimer qu'une diminution de la pression d'éclatement se produit lorsque l'énergie d'impact est supérieure à un seuil situé entre 1 kJ et 3 kJ pour les réservoirs vides de 36 L étudiés.

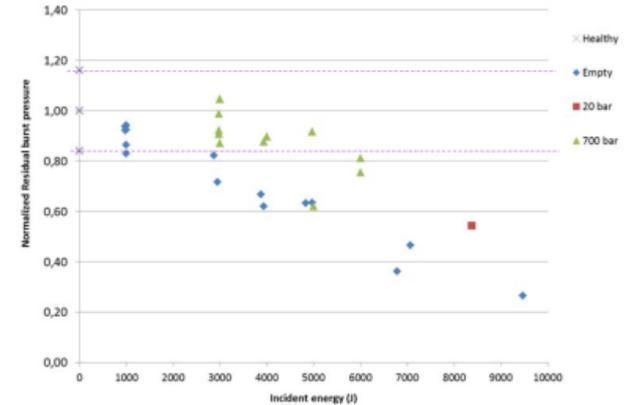
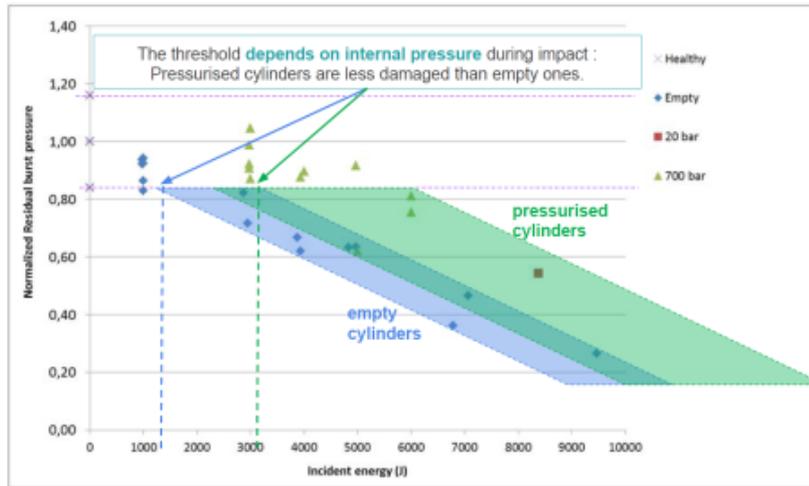


Réduction de la pression d'éclatement de bouteilles vides de 36 L impactées à différents niveaux d'énergie

# Comportement des réservoirs d'hydrogène de type III et VI aux agressions mécaniques

Lasn et al. (2017) ont réalisés des essais similaires aux travaux de Blanc-Vannet mais pour des réservoirs pressurisés à 20 et 700 bar.

Ils ont montré un comportement similaire des réservoirs même pressurisés initialement. Mais, le seuil de réduction de la pression de résistance ultime est augmenté lorsque le réservoir est pressurisé à une énergie supérieure à 3000 J.



Réduction de la pression d'éclatement de bouteilles pressurisées de 36 L impactées à différents niveaux d'énergie

# Comportement des réservoirs d'hydrogène de type III et VI aux agressions mécaniques

Lors du projet HYPACTOR, une étude de la résistance mécanique des réservoirs à des impacts répétés d'énergie croissante sur le même réservoir pressurisé a été conduite.

Le volume des réservoirs est de 36 L. La pressurisation initiale est à l'azote à des valeurs de 700 et 875 bar.

Le tableau suivant présente un résumé des résultats :

Pression initiale	Energie d'impact (kJ)	Conclusion
700 bar	1 et 5	Fuite du réservoir
700 bar	2, 4, 6 et 7 kJ	Eclatement pneumatique
875 bar	1, 2, 3, 4, 5 et 6 kJ	Eclatement pneumatique

Ces essais montrent l'effet cumulatif d'impact répétés qui peut entraîner l'éclatement ou la fuite du réservoir d'hydrogène.

# Comportement des réservoirs d'hydrogène de type III et VI aux agressions mécaniques

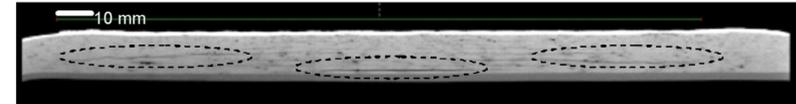
L'analyse tomographique des réservoirs impactés ont permis d'identifier les endommagements que subissent les parois des réservoirs composite :

- des ruptures de fibres ;
- des délaminages de fibres ;
- des fissures dans la matrice fibres/résine ;
- des déformations permanentes dans le liner dans le cas de réservoirs de type III.

Ainsi, les modifications internes à la paroi engendrés par un impact mécanique entraînent une diminution ou une perte de cohésion des fibres entre elles ou entre les fibres et la résine. Ainsi, il y a une modification de la répartition des contraintes mécaniques sur les fibres et la création de faiblesses mécaniques qui peut aboutir à la rupture du réservoir.



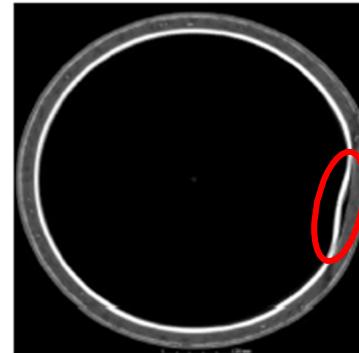
Zone impactée



Annular delamination at mid thickness

Delamination close to liner

Délaminage des fibres



Déformation du liner métallique après avoir été soumis à un impact mécanique sur la surface externe (Type III)

# Comportement des réservoirs d'hydrogène de type III et VI aux agressions mécaniques

Ainsi, la différence de matériau homogène comme les parois métallique, les défauts structurels de la paroi induits par un impact mécanique peuvent se situer à l'intérieur de la paroi. Ces faiblesses mécaniques induits peuvent ainsi ne pas être visible à l'extérieur du réservoir. Cela pose des questions quant à la détection de ces défauts car cela peut provoquer un accident comme celui présenté au transparent 20.

Le projet HYPACTOR s'est penché sur les techniques de diagnostic des lésions internes des parois comme la radiographie aux rayons X ou les épreuves acoustiques. Ces techniques peuvent donner des résultats satisfaisants mais ne font pas encore l'objet d'obligations réglementaires.

Le comportement des réservoirs composite d'hydrogène a été étudié aux impacts jusqu'à des énergies maximales de l'ordre de 10 kJ. Il a été montré que ces énergies n'entraînent pas d'éclatement direct du réservoir mais une diminution significative de la pression de résistance ultime du réservoir (70 % à 10 kJ).

Tout d'abord, ceci pose une question de la durée de vie et du contrôle du réservoir après impact :

- Les réservoirs doit-il être systématiquement remplacé par un impact ?
- Quels sont ses endommagements et sa durée de vie après un impact mineur (< 3 kJ, par exemple) ? Les cyclages en pression successifs ne vont-ils pas accélérer son vieillissement ?
- Il n'y a actuellement aucune obligation réglementaire.

# Comportement des réservoirs d'hydrogène de type III et IV aux agressions mécaniques

Si on regarde les énergies impliquées, 10 kJ représente une chute d'une masse de 50 kg d'une hauteur de 20 m. Cependant, 35 kJ représente un impact d'une masse de 90 kg à 100 km/h ou une masse de 1000 kg à 30 km/h, 100 kJ représente un impact d'une masse une masse de 1000 kg à 50 km/h et 380 kJ représente un impact d'une masse une masse de 1000 kg à 100 km/h. Ces énergies peuvent représenter des impacts lors d'accidents routiers.

Aucune étude n'a été menée pour qualifier le comportement de ces réservoirs à de telles énergies.

De plus, les essais réglementaires de qualifications (chute ou impact de balles) des réservoirs impliquent des énergies maximales de l'ordre de 3 kJ, ce qui est largement inférieur aux énergies impliquées lors d'impact routier.

Parmi les agressions mécaniques, seul l'impact mécanique direct a été largement étudié. La chute du réservoir est qualifiée au moyen d'un essai réglementaire. Mais, la littérature scientifique ouverte ne fait pas apparaître d'étude spécifiques quant à :

- l'écrasement des réservoirs vides ou sous pression,
- l'interaction du réservoir avec une onde de pression (onde de choc notamment) lors de l'éclatement d'un réservoir à proximité d'un autre (installation en cadre).

# 7. Comportement des réservoirs à la fatigue

# Comportement des réservoirs à la fatigue

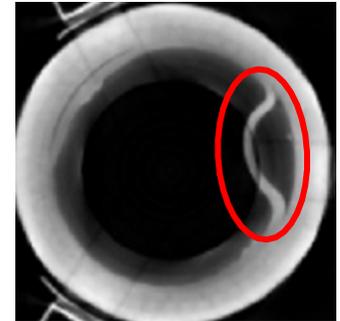
Les réservoirs d'hydrogène possèdent des fortes contraintes d'exploitation.

Pour les réservoirs métalliques de type I et II :

- Même si l'hydrogène n'est pas corrosif, il y a une forte interaction de l'hydrogène avec les parois métalliques du réservoir. En effet, les métaux sont soumis aux phénomènes de perméation qui conduit à la diffusion de l'hydrogène à travers la paroi et son interaction.
- De Miguel et al ont montré que pour un même réservoir présentant un défaut de fabrication (affaiblissement mécanique localisé) , le nombre de cycles en pression hydrauliques et en hydrogène auquel résiste un réservoir avant de fuir par rapport au même cyclage en hydrogène peut être diminué d'un facteur 10.

Pour les réservoirs de type III et IV,

- Les réservoirs doivent respecter un protocole de remplissage bien précis généralement normé (SAEJ 2601) qui n'entraîne pas d'élévation de température supérieure à 85°C, ce qui entrainerait une dégradation importante des liners (type IV). Pour compenser cette augmentation de température (effet Joule Thomson inverse), l'hydrogène est refroidi à -40°C avant le remplissage.
- Les réservoirs composites de type IV ne doivent pas être complètement dépressuriser sous peine de perte de cohésion entre le liner polymère et la coque composite (perte d'étanchéité).



Déformation du liner polymère d'un réservoir (Type IV)

Nerea de Miguel, Beatriz Acosta, P. Moretto, Laurent Briottet, Paolo Bortot, Elisabetta Mecozzi, Hydrogen enhanced fatigue in full scale metallic vessel tests – Results from the MATHRYCE project, International Journal of Hydrogen Energy, Volume 42, Issue 19, 2017, Pages 13777-13788

H.Barthelemy, M.Weber, F.Barbier, Hydrogen storage: Recent improvements and industrial perspectives, International Journal of Hydrogen Energy, Volume 42, Issue 11, 16 March 2017, Pages 7254-7262

# Comportement des réservoirs à la fatigue

Le comportement de réservoirs à la fatigue est pris en compte dans leur qualification par les essais standards :

- de cyclage en pression à température,
- de comportement «Fuite avant rupture»,
- de tolérance aux défauts du composite,
- de rupture accélérée sous contrainte,
- de cycles de pression à température extrême,
- d'étanchéité,
- de cycles avec l'hydrogène gazeux.

Ces essais sont appliqués pour tous les types de réservoirs.

Cependant, des variantes dans ces essais, notamment des essais de vieillissement accéléré par augmentation de la fréquence de cyclage hydraulique ou pneumatique sous hydrogène avec les mêmes gammes de pression que les essais standards (De Miguel et al.) entraînent une détérioration importante des réservoirs comme des ruptures de fibres en surface pour les réservoirs de type III ou l'apparition de cloques dans le liner élastomère pour les réservoirs de type IV et une diminution d'un facteur 2 du nombre de cycles auquel résiste le réservoir.

Nerea de Miguel, Geog Mair, Beatriz Acosta, Marius Szczepaniak, P. Moretto, Hydraulic and pneumatic pressure cycle life test results on composite reinforced tanks for hydrogen storage, Proceedings of the ASME pressure vessels and piping conference Vancouver 2016.



Figure 6: Two pictures of the cycled type 3 model tank's composite outer surface

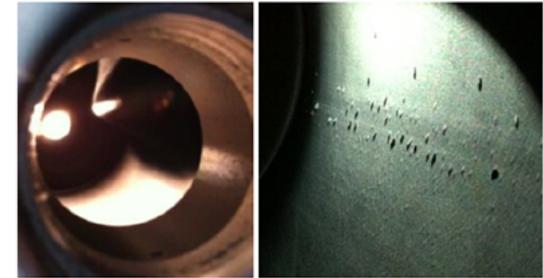


Figure 7: Picture of a type 4 tank with a buckled liner after the artificial aging and wall blistering

# Comportement des réservoirs à la fatigue

Les travaux de De Miguel et al. montrent qu'une variation dans les protocoles d'essais standards entraîne une diminution importante de la résistance à la fatigue des réservoirs.

Cela entraîne légitimement la question de l'endommagement ou du vieillissement prématuré des réservoirs si les protocoles de remplissage ne sont pas respectés (par une défaillance de l'automate de contrôle du remplissage) avec notamment un dépassement de la température de 85°C.

On peut se poser la question aussi de la tolérance des réservoirs à ces variations de protocole de remplissage et de leur effet cumulatif sur leur vieillissement (liner et coque composite).

Il n'y a pas pour l'instant de travaux sur le sujet.

# 8. Moyen de protection des réservoirs d'hydrogène aux agressions externes

# Causes d'éclatement des réservoirs de stockage d'hydrogène

Les causes d'éclatement d'un réservoir d'hydrogène sont suivantes :

- Un sur-remplissage (ou erreur au remplissage) ;
- Une agression thermique ;
- Une agression mécanique de type impact de choc, projectile, écrasement, chute, ...;
- La fatigue mécanique ;
- Une explosion interne.

Pour chaque cause d'éclatement, il est possible d'envisager des barrières de protection.

## Barrières de protection contre le sur-remplissage

Pour éviter que la pression dans le réservoir dépasse la pression de résistance ultime du réservoir, il pourrait être envisager de mettre en place une ou des soupapes de sécurité dont l'objectif est d'écrêter la pression à une valeur compatible avec la résistance mécanique du réservoir. La soupape est un dispositif actif en raison de la présence de pièce mécanique en mouvement et des ressorts de rappel.

Il pourrait être aussi envisagé des systèmes de type disque de rupture qui s'ouvre et vidange le contenu du réservoir. Une fois déclenché, il est nécessaire de les remplacer. Le disque de rupture est un dispositif passif.

Ces deux dispositifs peuvent être situés :

- sur un piquage du réservoir,
- sur les lignes de remplissage du réservoir.

## Barrières de protection contre l'explosion interne

Lors d'une explosion interne, la pression d'explosion est au maximum de 10 fois la pression initiale du mélange inflammable. Or en cas d'explosion, le réservoir peut éclater à partir de la moitié de la pression de résistance ultime du réservoir. Pour éviter l'éclatement du réservoir suite à une explosion interne, il faudrait que la pression de ruine du réservoir soit de l'ordre de 20 fois supérieure à la pression de service du réservoir, ce qui semble difficilement réalisable pour les pressions les plus élevées.

Ainsi, pour éviter ce risque, il est nécessaire de travailler à la prévention de la formation d'une atmosphère explosive dans le réservoir. On pourrait envisager la mise en place :

- de désoxygénateurs sur les lignes de remplissage du réservoir,
- de capteurs de concentration en oxygène, par exemple, pour s'assurer de son absence ou de sa présence en faible quantité.

# Barrières de protection contre les agressions thermiques

Parmi les moyens techniques permettant d'éviter l'éclatement d'un réservoir d'hydrogène lorsque celui-ci est soumis à une agression thermique, on peut trouver :

- Les moyens de réduction du chargement thermique,
- Les moyens de vidange rapide du réservoir.

# Réduction du chargement thermique

L'idée est l'amélioration du degré de résistance au feu des réservoirs de stockage d'hydrogène.

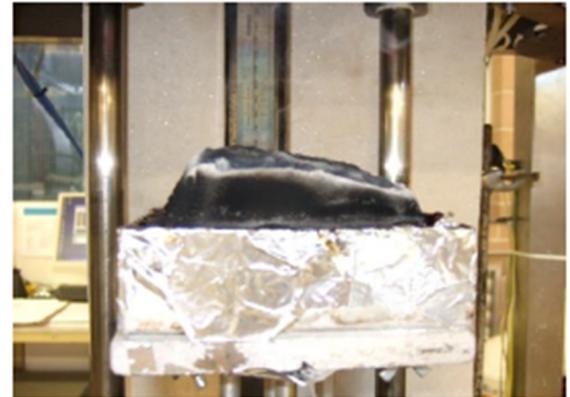
Parmi les moyens envisagés, on trouve les peintures intumescentes :

L'intumescence est une méthode polyvalente qui permet aux matériaux de réagir et de résister au feu. Lorsqu'il est chauffé au-delà d'une température critique, le matériau intumescent commence à gonfler et à se dilater, formant un revêtement isolant et limitant le transfert thermique et massique. Une peinture ou un revêtement intumescent est un système à plusieurs composants principalement constitué d'un agent de carbonisation (par exemple le pentaérythritol), d'un composant acide (par exemple le polyphosphate d'ammonium) et d'un agent spumogène/gonflant (par exemple la mélamine).

Les travaux expérimentaux ont démontré que, même lorsqu'une seule couche de peinture intumescente (de l'ordre de 7 à 20 mm) est appliquée sur un réservoir de type IV, la durée de résistance au feu passe de quelques minutes à 2 heures.



**Intumescent coating before the fire exposure**



**Intumescent coating after the fire exposure**

# Réduction du chargement thermique

Parmi les moyens de réduction du chargement thermique, il est possible de appliquer une fine couche de matériau céramique (ou d'un autre revêtement résistant à la chaleur) sur la surface extérieure de l'enveloppe composite.

Alors que la surface extérieure peut supporter des températures de flamme supérieures à 800°C, la surface intérieure du revêtement subit des températures inférieures à 200°C.

La figure a montre un essai au feu effectué sur un réservoir composite revêtu d'un matériau isolant en céramique pulvérisée.

La figure b est une photographie montrant l'état intact d'un réservoir composite enveloppé d'une couverture en céramique après avoir été exposé à un feu localisé intense pendant 45 minutes.



a- Réservoir composite revêtu d'un matériau isolant céramique pulvérisé



b- Etat de surface d'un réservoir composite enveloppé d'une couverture céramique

## Réduction du chargement thermique

Une autre méthode de protection contre l'incendie des réservoirs est d'encapsuler l'ensemble du système de carburant dans une enveloppe protectrice constituée d'une mousse thermo-isolante.

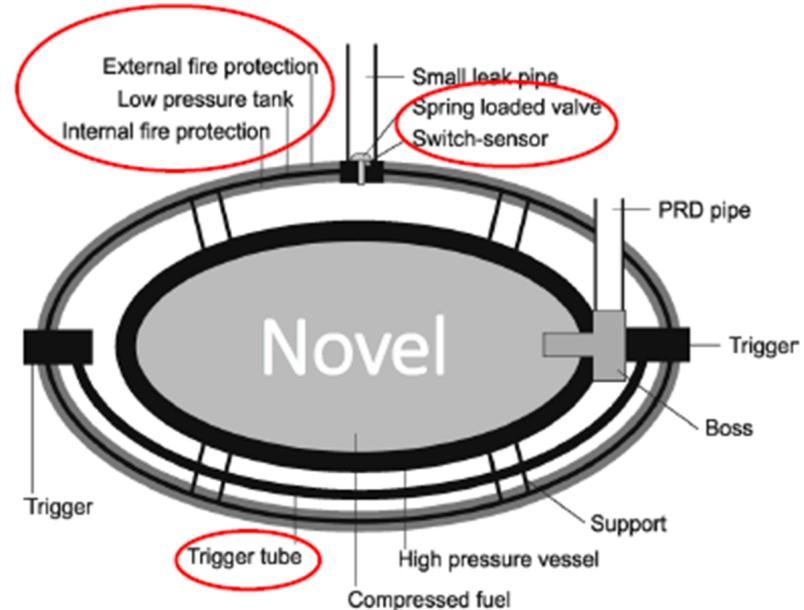
L'encapsulation protectrice ne confère pas seulement une protection contre l'incendie, mais fournit également un niveau supplémentaire de protection contre les chocs au réservoir.

Cela peut permettre aux concepteurs de réservoirs de réduire la quantité de matériaux composites de renforcement, ce qui pourrait réduire le coût et le poids des futurs systèmes de stockage d'hydrogène.



# Réduction du chargement thermique

Des travaux en cours menés à l'Université d'Ulster consistent à encapsuler les réservoirs dans une coque recouverte de protection thermique.



# Vidange rapide du réservoir

Parmi les dispositifs de vidange des réservoirs d'hydrogène, on retrouve les dispositifs de décompression à activation thermique (TPRD = Thermally activated Pressure Relief Device).

Il permet une libération contrôlée et totale de l'hydrogène d'un réservoir de stockage à haute pression avant que ses parois ne soient affaiblies par les hautes températures.

Un fois ouvert, le TPRD ne se referme pas. La repressurisation du réservoir est alors impossible.

Les réservoirs d'hydrogène et les TPRD qui ont été soumis à une agression thermique sont censés être mis hors service et détruits.

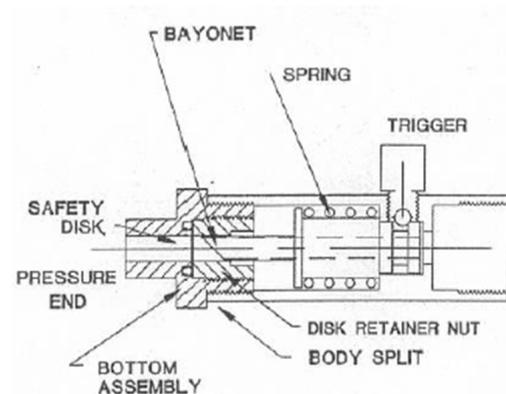
# Vidange rapide du réservoir

Les TPRD sont conçus pour s'ouvrir lorsque la pression ou la température atteint une certaine limite.

Les TPRD s'ouvrent si la température est supérieure à 108-110°C.

Il existe deux technologies de TPRD :

- Les TPRD à ampoule → L'ampoule est creuse et contient un liquide. En chauffant, l'ampoule se brise, ce qui libère un clapet qui se déplace. Cela décomprime un joint torique qui permet au gaz d'être évacué par les orifices radiaux.
- Les TPRD à baïonnette ou TPRD Eutectique → Lorsqu'il atteint sa température de déclenchement (environ 124°C), une pièce constituée d'un matériau eutectique fond et permet au roulement à billes de se déplacer et de libérer le ressort. Le mouvement du ressort entraîne le mouvement d'une baïonnette qui perce un disque de sécurité. Le contenu des réservoirs est alors libéré par la baïonnette creuse.



PRD before (left) and after activation (right)

[A bayonet PRD used in CNG buses \(Mirada\)](#)



[Glass bulb PRD \(Rotarex\)](#)

Une étude spécifique de la défaillance des TPRD a été menée par l'Ineris et a fait l'objet du rapport DRA-18-171011-10314A intitulé « ETUDE DE LA FIABILITÉ DES THERMOFUSIBLES DE RÉSERVOIRS DE STOCKAGE D'H2 À L'AIDE D'UNE PRÉ-AMDE »

## Vidange rapide du réservoir

On retrouve des situations (notamment pour les camions trailer de transport d'hydrogène) dans lesquelles un seul TPRD est installé pour une dizaine de réservoir.

Même si le TPRD est bien dimensionné, c'est-à-dire qu'il est en capacité à vidanger les 10 réservoirs pour éviter qu'ils éclatent, son installation est-elle suffisamment bien réalisée pour être certain qu'il voit une température supérieure à 110°C dans tous les cas ? En effet, si on imagine un réservoir agressé par un feu torche loin du TPRD, celui-ci verra-t-il la chaleur ?

# Vidange rapide du réservoir

Parmi les dispositifs de vidange des réservoirs d'hydrogène, on retrouve les soupapes de sécurité.

La particularité d'une soupape de sécurité est de ne pas complètement vidanger le contenu du réservoir d'hydrogène mais de s'ouvrir à sa pression de tarage, de libérer une partie de gaz contenu et de se refermer lorsque la pression devient inférieure à la pression de tarage. La soupape permet ainsi de limiter la pression dans le réservoir à une valeur proche de la pression de tarage de la soupape (à condition qu'elle soit bien dimensionnée).

Cette technique pourrait s'avérer inefficace :

- pour les réservoirs composites étant donné que les essais montrent que les réservoirs peuvent éclater à leur pression de service.
- Si la vitesse de chauffe du réservoir et sa montée en pression des réservoirs de type métallique (I et/ou II) n'est pas compensée par le débit de passage de la soupape (mauvais dimensionnement ou section de passage diminuée par une défaillance).

# Barrières de protection contre les agressions mécaniques

Le principe de protection contre les agressions mécaniques réside dans la mise en place d'un élément extérieur aux réservoirs qui reçoit la sollicitation mécanique et atténue les effets afin que les conséquences résiduelles sur le réservoir soient inexistantes ou à minima compatible avec les résistances mécaniques du réservoir.

# Barrières de protection contre les agressions mécaniques

Il est possible d'envisager la mise en place :

- de renfort mécanique sur la structure support du ou des réservoirs. Pour cela, il est nécessaire que les renforts soient bien dimensionnés vis-à-vis de l'agression envisagée.
- d'un revêtement extérieur au réservoir qui viendrait atténuer ou dissiper la sollicitation mécanique
- d'encapsuler le ou les réservoirs dans une enceinte de protection suffisamment résistante et bien dimensionnée aux agressions externes comme le proposent Gambone et al.



Protection mécanique Vickodeck développée par société Vipo



Encapsulation des réservoirs dans une enceinte résistante

# Barrières de protection contre la fatigue

La protection contre la fatigue mécanique des réservoirs est difficile à mettre en place étant donné que les défaillances majeures du réservoir arriveront après un certain temps d'exploitation.

Pour garantir la tenue des réservoirs, il faut avoir plutôt recours au contrôle périodique des réservoirs.

Pour les réservoirs métalliques, la réglementation impose une épreuve hydraulique à une période bien définie typiquement de 4 à 10 ans (directive des équipements sous pression et directive des équipements sous pression transportables).

Les réservoirs composites destinés au stockage stationnaire sont soumis aux mêmes règles de contrôles périodiques. En revanche, aucun contrôle n'est imposé pour les réservoirs composites des applications mobiles.

Mais lors des contrôles, il faut être bien sûr que la méthode de diagnostic soit suffisamment précise pour détecter les endommagements localisés du liner et des parois composites.

# 9. Conclusions

# Conclusions

L'hydrogène est un gaz très énergétique mais il présente un inconvénient important. Dans les conditions ambiantes de pression et de température, il est à l'état gazeux avec une densité très faible. Ainsi, pour se ramener à des densités énergétiques massiques que l'on connaît comme celle de l'essence, il est nécessaire d'augmenter les masses d'hydrogène stockées. Pour cela, une des solutions est de le stocker sous très fortes pressions à plusieurs centaines de bars.

Pour relever ce défi, les constructeurs ont développé des réservoirs d'abord complètement métalliques (de type I). Puis, ils ont augmenté les pressions de stockage en rajoutant un renfort circonférentiel de matériau composite autour du réservoir métallique (réservoir de type II). Ils ont finalement abouti à une solution de réservoirs complètement composites (de type III et IV) pour gagner en poids.

Cependant, ces réservoirs peuvent présenter des risques d'éclatement dont les conséquences sont inadmissibles (émission d'onde de choc, boule de feu, projection de fragments).

Il convient donc d'étudier le comportement de ces réservoirs aux différentes sollicitations qui peuvent entraîner leur éclatement, à savoir le sur-remplissage, l'explosion interne, les agressions thermiques et mécaniques et la fatigue et de recenser les techniques de mitigation adéquates.

# Conclusions

Pour leur homologation, ces réservoirs dont l'objet d'un certain nombre de tests de qualification qui couvre la fatigue mécanique avec des cyclages en pression dans différentes conditions (température, endommagement localisé, ...), la résistance au feu lorsque le réservoir est équipé d'un dispositif de protection ou des chocs mécaniques à des énergies d'impact ne dépassant pas 3 kJ.

Parmi les causes conduisant à l'éclatement, les agressions thermiques et mécaniques ont donné lieu aux plus grands nombres d'études au cours des dernières années principalement pour les réservoirs composites. Les comportements des réservoirs métalliques de type I semblent plutôt bien connus. En revanche, le comportement des réservoirs de type II est souvent assimilé à celui des réservoirs de type I et n'a jamais l'objet d'étude spécifique.

Les principaux enseignements que l'on peut retenir pour les agressions thermiques sont :

- que la tenue au feu sans protection est de l'ordre de 5 minutes,
- que les parois du réservoir sont de très mauvais conducteurs de chaleur si bien que le réservoir éclate à une pression proche de sa pression de service pour les réservoirs de type IV et à 1,5 fois sa pression de service pour les réservoirs de type III,
- que les agressions thermiques sur les réservoirs de type III sans protection conduise à l'éclatement alors qu'il existe des situations pour lesquelles le réservoir de type IV fuit avant d'éclater : c'est le cas lorsque la pression est inférieure à 2 à 3 fois la pression de service où le liner polymère à le temps de fondre avant que le front de dégradation de la résine ait atteint une épaisseur critique.

Le comportement de réservoirs pris unitairement apparaît plutôt bien connu et qualifié par un test standard du réservoir et de sa protection. Cependant, aucun test réglementaire n'est prévu pour déterminer la tenue ultime des réservoirs (ce que regrette les services de secours) et son temps de résistance.

De plus, aucuns travaux n'ont été réalisés lorsque les réservoirs sont assemblés (en cadre notamment).

# Conclusions

Les principaux enseignements que l'on peut retenir pour les agressions mécaniques sont :

- que pour des réservoirs de volume supérieur ou égale à 36 litres, une énergie d'impact de 10 kJ n'est pas en mesure de provoquer l'éclatement du réservoir
- que l'impact d'un projectile d'une énergie supérieure à 3 kJ entraîne une forte diminution de la pression de résistance ultime du réservoir.
- qu'à la différence des matériaux homogènes comme les matériaux métalliques, les défauts structurels induit par un choc peuvent ne pas être visible à la surface du réservoir mais se situer à l'intérieur de la paroi (délaminage de couches de fibres, par exemple). Ainsi, les modifications internes à la paroi entraînent une diminution ou une perte de cohésion des fibres entre elles ou entre les fibres et la résine provoquant une modification de la répartition des contraintes mécaniques sur les fibres et la création de faiblesses mécaniques qui peut aboutir à la rupture du réservoir,
- que l'accumulation de choc sur le réservoir peut entraîner son éclatement.

L'impact mécanique direct a été largement étudié. La chute du réservoir est qualifiée au moyen d'un essai règlement. Mais, la littérature scientifique ouverte ne fait pas apparaître d'étude spécifiques quant à l'écrasement des réservoirs vides ou sous pression, et l'interaction du réservoir avec une onde de pression (onde de choc notamment) lors de l'éclatement d'un réservoir à proximité d'un autre (installation en cadre).

Les essais réglementaires de qualifications (chute ou impact de balles) des réservoirs impliquent des énergies maximales de l'ordre de 3 kJ. Les énergies impliquées sont largement inférieures aux énergies impliquées lors d'impact routier. Ainsi, ces essais semblent peu contraignants vis-à-vis des sollicitations envisageables au cours de la vie d'un réservoir.

Les problématiques de fatigue des réservoirs semblent bien maîtrisés par les essais réglementaires d'homologation. Cependant, des travaux montrent que des variantes dans ces protocoles de test peuvent engendrer un vieillissement accéléré.

# Conclusions

Pour se prémunir de ces éclatements, il existe un certain nombre de barrières :

- Pour l'explosion interne, il faut prévenir la formation d'une atmosphère inflammable dans le réservoir.
- Pour le sur-remplissage, la mise en place de soupapes ou de disques de rupture peut éviter la montée en pression excessive du réservoir.
- Pour les agressions thermiques, la mise en place de protection thermique comme une couverture céramique ou une peinture intumescente ou une encapsulation des réservoirs dans un contenant résistant au feu peut permettre d'augmenter de manière importante de la tenue des réservoirs au feu. Mais, la protection la plus développée est le TPRD ou fusible thermique dont l'objectif est de vidanger le contenu du réservoir dès qu'il voit une température de l'ordre de 110°C. Ce dispositif est testé en même temps que le réservoir lors du test d'homologation. Cependant, On retrouve des situations pour lesquelles, notamment pour les camions trailer de transport d'hydrogène, un seul TPRD est installé pour une dizaine de réservoir. Même si le TPRD est bien dimensionné, c'est-à-dire qu'il est en capacité à vidanger les 10 réservoirs pour éviter qu'ils éclatent, son installation est-elle suffisamment bien réalisée pour être certain qu'il voit une température supérieure à 110°C dans tous les cas ?
- Pour les agressions mécaniques, le principe de protection réside dans la mise en place d'un élément extérieur aux réservoirs qui reçoit la sollicitation mécanique et atténue les effets afin que les conséquences résiduelles sur le réservoir soient inexistantes ou a minima compatible avec les résistances mécaniques du réservoir comme un revêtement extérieur dissipatif ou des protections physiques sur les supports des réservoirs.
- Pour la fatigue mécanique, outre les tests d'homologation, la réglementation des équipements sous pression impose des épreuves périodiques. Cependant, il n'y a aucune obligation pour les réservoirs à usage mobile.

Ce que laisse penser les études présentées précédemment est que les endommagements peuvent être localisés et de faibles amplitudes selon les sollicitations mais assez cumulatifs. Or, aucune étude ne présente l'impact potentiel de ces cumuls sur les éclatements de réservoirs.

De plus, pour identifier le cumul de ces endommagements, il faut disposer d'une méthode de diagnostic qui permettent de qualifier leur évolution et des critères décisionnels qui permettraient le déclassement des réservoirs endommagés.