



POST_DOC / Ingénieur de recherche– ICA Toulouse / ISAE-SUPAERO

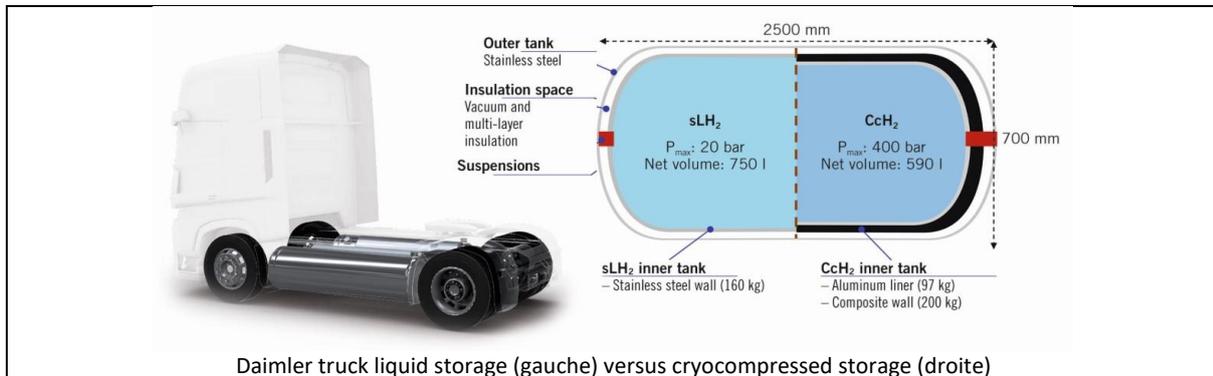
Titre du projet : Buffers pour Compression Isochore Cyclique et Séquentielle pour un Système de Distribution de H2 gazeux avec Température, Pression et Débit Réglables en partant d'un Stockage de H2 liquide

La décarbonation de l'économie va passer, entre autres, par une hydrogénation (verte, bleue ou turquoise) de l'économie. L'hydrogène sera consommé en tant que tel, soit pour fournir de l'électricité dans des piles à combustible, soit pour servir de carburant dans des moteurs à combustion interne adaptés, ref [1]. Il servira aussi simplement au stockage transitoire d'énergie en vue de la production de SAF (Sustainable Aviation Fuel) ou encore d'autres Combustibles Alternatifs par exemple, avec une capture de CO2 dans l'atmosphère ou à la source.

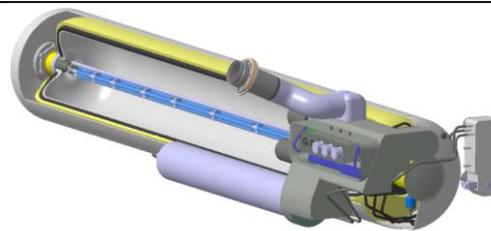
Ce projet consiste à rendre possible la mobilité avec l'hydrogène pour des véhicules dis « exigeants » par des contraintes de poids, de volumes, longues autonomies requises, de fortes consommations nécessaires impliquant de hautes variabilités de vitesse ou encore, aux fortes restrictions de sécurité pour des applications très sollicitées et nécessitant d'embarquer de grandes quantités d'énergie (entre 10kg et 300kg d'hydrogène). De ce fait il est en adéquation directe avec la Sous-thématique numéro 2 de l'Appel Astrid relative aux Carburants Alternatifs.

1. CONTEXTE

Malgré toutes les annonces et les démonstrateurs ayant roulés ou volés, une solution fiable et opérationnelle n'existe encore pas actuellement en tant que système embarquable et industrialisable afin de pouvoir délivrer un débit contrôlable de l'H2 gazeux à partir d'un stockage cryogénique sous contraintes de poids, volume et sécurité ; contraintes prohibant de facto l'utilisation des cryopompes (sécurité et couts), compresseurs (poids) et imposant l'utilisation des vannes cryogéniques de type « Tout ou Rien » (seules disponibles dans ces domaines de température). Parmi les plus avancés on peut compter Daimler Truck avec leur camion ref [2] (mais dont le poids du réservoir, 500kg, est très important par rapport à la pression du liquide requise de 20 bars, s'aggravant si l'on voulait augmenter le diamètre), BMW avec du Cryocompressé ref [3] (complexité difficilement maitrisable) et Toyota (qui doit changer les cryopompes toutes les 8h sur leur voiture de course, ref [4]).



Toyota liquid storage



BMW cryocompressed storage

Chez Aresia, après avoir intégré et participé à des nombreux projets sur le H₂ (Airbus, CORAC, Universal Hydrogène, Safran, IRT Jules Verne, Cetim, Onera mais aussi ET EnergieTechnologie, Cryostar, Cryopal, Solution F, la FIA...) et ayant échangé avec de nombreux acteurs impliqués dans le développement de ce type de solution, nous avons obtenu la reconnaissance de tous ces acteurs pour avoir adopté une approche complètement différente en développant notre propre solution sur la base de notre propre architecture brevetée. Ainsi, on est devenu le deuxième acteur français à pouvoir fabriquer un réservoir cryogénique pour contenir de l'H₂ liquide (NB réservoir qu'on a dû faire remplir en Allemagne auprès de ET Technologie à cause de difficultés de maîtrise de ce type d'essai sur notre territoire Français).

Ci-après quelques éléments de contexte nous ayant poussé vers nos propres développements, pour des raisons de volume et de poids contraints, le stockage gazeux comprimé supérieur à 700 bars et le stockage liquide en cryogénie à -254° C sont les voies technologiques les plus accessibles, ref [5]. Le stockage Cryocompressé ref [6] est en train de se développer (notamment en Allemagne par BMW avec le soutien de ET EnergieTechnologie). Cependant, il faut garder en tête que même si la densité énergétique massique du l'H₂ est remarquable (jusqu'à 3 fois plus grande que le gazole - 120 MJ/kg contre 38 MJ/kg) la densité énergétique volumique est-elle plus pénalisante (14l/kg pour le liquide cryogénique et 26 litres/kg pour H₂ gazeux à 700 bars), ref [7]. Le stockage de l'énergie va prendre ainsi, comparé aux énergies fossiles, de 3,5 fois (dans son état de liquide cryogénique) à 7 fois (dans son état gazeux comprimé à 700bars) plus de volume. Si on prend en compte les efficacités différentes entre les moteurs à combustion interne contre les systèmes pile à combustible couplées à des moteurs électriques, on tombe à des besoins en volume de stockage 4,5 fois supérieurs. (e.g. une voiture avec un réservoir de 50 litres de gasoil devrait avoir 225 litres d'H₂ comprimé à bord impliquant des poids de réservoirs supérieurs à 250 kg considérant les

dernières nouveautés de l'état de l'art, vu à l'exposition de la dernière édition du Salon Hyvolution '24). Tous les véhicules devront s'adapter (voire se transformer radicalement) pour pouvoir offrir ce volume à bord.

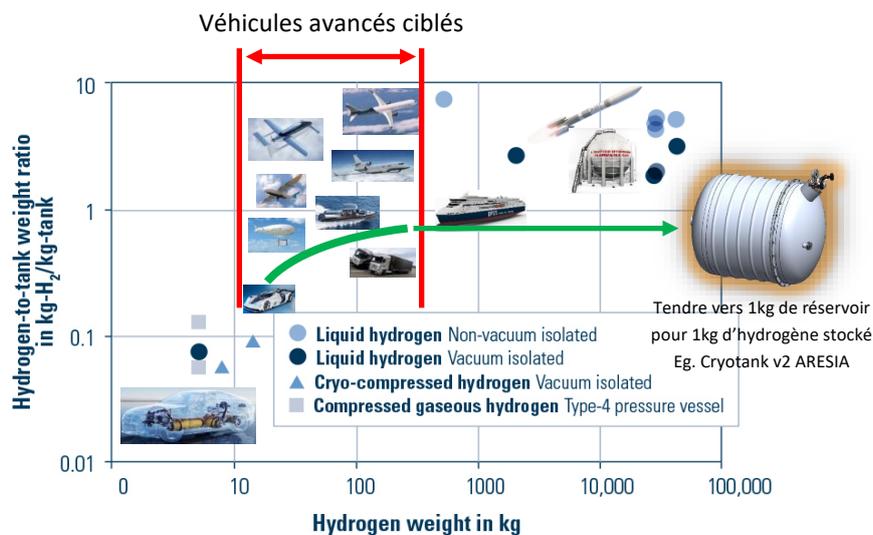


Exemple de réservoir à 700 bars existant :
250kg pour 16kg de GH2



L'étude de l'Université de Delft, ref [8], montre l'intérêt en terme de poids et l'existence de réservoirs composites embarquant jusqu'à 10kg d'H2 embarqué par rapport aux réservoirs cryogéniques.

Au-delà de 10 kg d'H2 par contre, sous certaines conditions, le stockage cryogénique s'impose par son indice gravimétrique (contenant moins lourd par rapport à la quantité d'énergie contenue). Or, de nombreux véhicules ont justement des besoins d'embarque plus de 10 kg d'H2 pour l'autonomie qu'ils requièrent par exemple et il n'existe actuellement aucune solution sur le marché.



Encadrement du segment visé par notre technologie sur ce graphique établi par Delft University of Technology sur lequel on montre que rien n'existe entre 10kg et 300kg



Constat 1 - A l'heure actuelle les réservoirs cryogéniques isolés sous vide ne sont envisagés que dans une optique de garantie du vide entre les deux enveloppes (vide entre les parois d'un thermos). Aucun réservoir n'est conçu pour être démontable et réparable. Celui-ci est le premier objectif de notre Système : réaliser le premier réservoir de stockage cryogénique isolé sous vide démontable et réparable. Le concept a été breveté et des prototypes / Preuves de Concepts (PoC) ont été réalisés (sous NDA avec des industriels ayant fait des grandes annonces dans la presse récemment).

2. OBJECTIFS DU PROJET

Le Projet se propose de développer le Buffer de gazéification et de compression isochore intégré dans le système breveté d'ARESIA de distribution d'hydrogène gazeux à partir d'un stockage liquide évitant la nécessité de machines à piston ou de machines tournantes lourdes et peu fiables tel que des pompes cryogéniques ou des compresseurs. Cet organe buffer représente un composant critique/verrou technologique faisant partie d'un système innovant permettant la distribution de H₂ gazeux à des températures ambiantes en partant d'un stockage liquide cryogénique. Ce système est contraint par le poids, le volume, le débit, la sécurité et les briques technologiques disponibles.

Pour ce système, nous prévoyons l'utilisation d'organes tel que le « Cryotank » ou stockage d'hydrogène liquide central de notre conception pour devenir les premiers systèmes cryogéniques et isolés sous vide au monde conçus pour être démontables, inspectables et réparables (ref [11]), en vue de lui garantir une employabilité en conditions opérationnelles à bord des véhicules. C'est aussi le premier système au monde qui va distribuer de l'H₂ gazeux, à partir de liquide sans utilisations de « cryopompes » et/ou de compresseurs.

Un autre composant critique/verrou technologique faisant partie de ce système est représenté par le comportement en fatigue du cordon de soudure entre le récipient intérieur et le soufflet de liaison avec l'enveloppe extérieure du réservoir cryogénique. La solution sera développée en parallèle à ce Projet dans le cadre d'une thèse de doctorat faisant l'objet d'une convention CIFRE avec l'ANRT et le laboratoire LMS de l'École Polytechnique et avec des essais qui se feront pour la partie cryogénique au centre du CETIM à Nantes, ref **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**

Des systèmes de stockage cryogénique d'H₂ démontables et réparables n'existent pas. Des systèmes de distribution d'H₂ gazeux à débit contrôlable à partir de liquide cryogénique sans utilisation de « cryopompe » et/ou compresseur n'existent pas actuellement pour délivrer des pressions supérieures à 30 bars. Le système développé s'appuie sur une architecture de distribution par remplissage et vidange cyclique et séquentielle des réservoirs tampons de gazéification et compression isochore, architecture récemment brevetée et dont les premiers rapports d'examineurs sur les demandes de brevets déposées se sont avérés positifs quant à leur brevetabilité.



3. ORGANIZATION DES ACTIVITES

Les travaux seront composés de 4 phases :

- Phase 1 : Etat de l'art et établissement d'une stratégie de tests de modélisation thermique, thermodynamique et mécanique (statique et fatigue).
- Phase 2 : Développement de modèle thermique et thermomécanique simplifiés (0D, 1D, Axisymétrique composites...etc) représentatif des échanges d'énergies du système de buffer développé. Développement d'une campagne d'essais sur le comportement à basse température des matériaux envisagés.
- Phase 3 : Développement de modélisations détaillées des solutions envisagées prenant en compte des défauts potentiels (Tolérance aux dommages) sous sollicitations statiques et dynamiques (Endommagement, rupture, propagation de fissure...etc). Conception des interfaces réservoir / structure du véhicule. Aide à la conception des réservoirs
- Phase 4 : Participation aux tests à l'échelle 1 et validation des différentes modélisations proposées. Validation du design et du cycle de remplissage/vidange

Profil recherché : Ingénieur ou Docteur, avec une spécialisation en Mécanique, Génie Mécanique, Mécanique des matériaux, Numériques et éléments finis. Des compétences en thermique et thermodynamique seront appréciées. Il (elle) possède un goût pour la simulation numérique et l'expérimentation. Une connaissance et/ou expérience des modèles de comportement serai(en)t très fortement appréciée(s). Autonomie, rigueur et force de proposition seront nécessaires à la bonne réussite du projet.

Localisation : ISAE-SUPAERO DMSM / Institut Clément ADER - UMR CNRS 5312, Toulouse

Début de l'embauche: à partir de Mars 2025 (durée 24 mois)

Salaire : 2800 à 3500 brut/mois en fonction du niveau du recrutement (BAC+5 à BAC+8).

Contacts :

Envoyer CV, lettre de motivation et référence par mail à :

INSTITUT CLEMENT ADER (UMR CNRS 5312) / ISAE-SUPAERO-DMSM:

Frédéric LACHAUD : Frederic.Lachaud@isae-supaeero.fr



ISAE-SUPAERO / DAEP :

Sébastien DUPLAA : Sebastien.Duplaa@isae-supaeero.fr

ARESIA :

Florin PAUN : florin.paun@aresia.com

Nicolas WALKER : nicolas.walker@aresia.com

Références :

[1] LAMARI, Farida et MALBRUNOT, Pierre. Combustible hydrogène-Utilisation. Les Techniques de l'Ingenieur, 2013, p. BE8566
[2] Auto-info, Daimler Truck lance la première flotte d'essais clients pour le camion Mercedes-Benz GenH2 à hydrogène, Fabio CROCCO, décembre 2023 (https://www.auto-infos.fr/article/daimler-truck-lance-la-premiere-flotte-d-essais-clients-pour-le-camion-mercedes-benz-genh2-a-hydrogene.280328)
[3] BMW, L'esprit pionnier pour la mobilité du futur, Markus Löblein, septembre 2024
[4] Toyota Times - World-First Liquid Hydrogen Car's 18-Month Journey to the Finish Line (https://toyotatimes.jp/en/report/hpe_challenge_2023/004_3.html#anchorTitles)
[5] DESCHAMPS, Johnny. Filière hydrogène: principaux verrous et intérêt du Power to Gas. Techniques de l'Ingénieur, 2019.
[6] Orbria MICHEL et Bertrand BELLO, Note de veille – stockage des gaz – réservoirs d'hydrogène cryogéniques et cryocompressés en composite, CETIM, juin 2020
[7] ADLER, Eytan J. et MARTINS, Joaquim RRA. Hydrogen-powered aircraft: Fundamental concepts, key technologies, and environmental impacts. Progress in Aerospace Sciences, 2023, vol. 141, p. 100922.
[8] RAO, Arvind Gangoli, YIN, Feijia, et WERIJ, Henri GC. Energy transition in aviation: The role of cryogenic fuels. Aerospace, 2020, vol. 7, no 12, p. 181.
[9] Chaire Industrielle DELHYCE (https://www.univ-orleans.fr/fr/prisme/les-projets/en-cours/moteurs-combustion-interne-hydrogene/les-projets/chaire-industrielle)
[10] Comparison of various physical hydrogen storage options (source: Bauhaus Luftfahrt e.V. (https://www.bauhaus-luftfahrt.net/en/topthema/hy-shair/))
[11] Brevet FR n°2203468 – Dispositif aéronautique démontable de stockage de gaz liquéfié
[12] FULCHERI, Laurent. La pyrolyse du méthane: de l'hydrogène « gris » à l'hydrogène « turquoise ». L'Actualité Chimique, 2021.
[13] Montagne B, Lachaud F, Paroissien E., Martini D., Congourdeau F



Failure analysis of single lap composite laminate bolted joints: Comparison of experimental and numerical tests. Composite Structures 238 (2020) 111949

