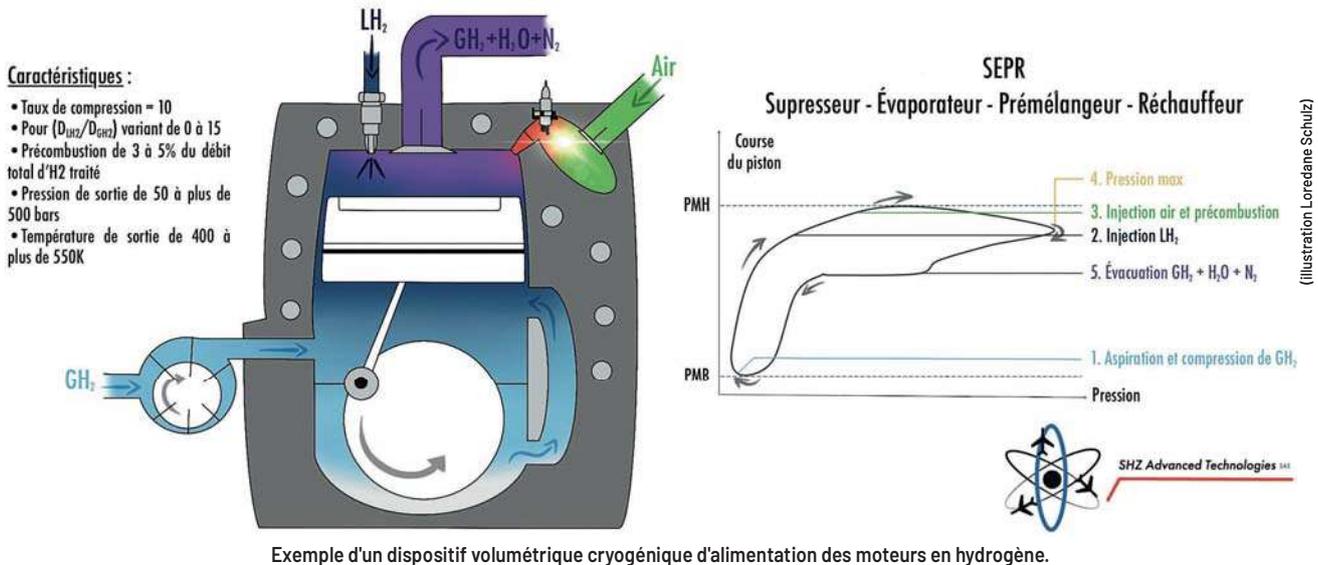


Comment alimenter les propulseurs avec de l'hydrogène liquide ?

Générateur cryogénique d'hydrogène gazeux pressurisé et réchauffé



Exemple d'un dispositif volumétrique cryogénique d'alimentation des moteurs en hydrogène.

Jean-Michel Schulz, ingénieur spécialisé de l'ISAE-Supaero est professeur à la HEIG-VD (Suisse) et à L'EIGSI de La Rochelle. Il a participé à de nombreux programmes aéronautiques et spatiaux, singulièrement dans le domaine de la cryogénie. Dans cette tribune, il décrit un concept particulièrement novateur d'injection d'hydrogène liquide pour les moteurs, les turboréacteurs et les piles à combustible.

Depuis plus de trois années, la start-up française **SHZ Advanced Technologies** innove dans le domaine de l'hydrogène liquide, ce qui lui a permis de proposer un concept de système intégré de stockage et de distribution d'hydrogène liquide particulièrement bien adapté pour des avions régionaux, moyen-courriers, mais aussi aux appareils long-courriers.

SHZ Advanced Technologies œuvre actuellement sur la conception d'un système de « générateur cryogénique d'hydrogène gazeux pressurisé et réchauffé » de type SEPR (surpresseur-évaporateur-prémélangeur-réchauffeur) et capable d'alimenter en carburant les moteurs, turbomoteurs, turbopropulseurs, turboréacteurs, statoréacteurs, moteurs de fusées et même les piles à combustible, sur la base d'un stockage d'hydrogène liquide.

Une des difficultés pour l'alimentation en hydrogène liquide des moteurs consiste à préparer le fluide en lui donnant les conditions de pression et de température nécessaires à son injection et à sa combustion. Si dans le cadre d'un système propulsif électrique alimenté par une pile à combustible quelques bars suffisent pour l'alimentation de l'hydrogène, il faudra près d'une centaine de bars dans le cadre d'un turboréacteur ou d'un turbopropulseur et même plusieurs centaines de bars pour des moteurs alternatifs à injection directe. Une autre difficulté concerne la température à laquelle l'hydrogène est transporté et injecté, qui peut être à l'origine de la liquéfaction, voire de la solidification des composants de l'air en dessous de 80 K (kelvin) et générer de la glace avec l'humidité présente dans l'air ou encore engendrer des givrages extérieurs susceptibles de perturber ou d'endommager des organes des moteurs ou même de l'aéronef. Par ailleurs, le transport de fluide multiphasés (tantôt pour partie liquide ou gazeux dans la



Jean-Michel Schulz est ingénieur spécialisé de l'ISAE-Supaero et cofondateur de la start-up SHZ Advanced Technologies.

même canalisation) est complexe à mettre en œuvre et à gérer, particulièrement lorsque les débits, les pressions et les températures peuvent avoir de grandes amplitudes.

Enfin, lors de la combustion de l'hydrogène dans l'air, peuvent apparaître des NOx qui sont des polluants. La quantité de NOx produite par une combustion est proportionnelle à la température de la combustion et à la durée à cette haute température. C'est pourquoi il peut être intéressant, voire nécessaire, de procéder à une phase de prémélange et de précombustion entre l'hydrogène et l'air avant la combustion finale dans le moteur. Une combustion riche en hydrogène et pauvre en oxygène limite la température de combustion et de fait la création de NOx.

Lorsqu'il est stocké dans des réservoirs cryogéniques, une partie de l'hydrogène liquide à 20 K s'évapore naturellement sous l'effet des entrées de chaleur. Cette quantité est difficile à gérer, car elle dépend de la conception, de la minutie de la fabrication, du vieillissement et des conditions d'utilisation (température extérieure, durée de stockage, pression, vibrations, etc.). Par ailleurs, il est plus simple d'alimenter les moteurs en général et les piles à combustible plus encore, avec de l'hydrogène gazeux. Il existe donc un réel intérêt à proposer un carburant directement sous forme gazeuse aux différents moteurs, y compris dans les canalisations d'alimentation de carburant autour des parties chaudes.

Une grande adaptabilité aux systèmes de stockage embarqués et à leurs conditions d'utilisation

Le nouveau « générateur cryogénique d'hydrogène gazeux pressurisé et réchauffé » consiste donc à alimenter un moteur ou une pile à combustible avec un carburant cryogénique, dont une partie est liquide et une autre partie est gazeuse. Ce dispositif permet d'utiliser la partie supérieure gazeuse dite « évaporation naturelle » d'un réservoir d'hydrogène liquide et de compléter le débit par un prélèvement d'hydrogène liquide, pour finalement alimenter le moteur avec un flux total d'hydrogène gazeux pressurisé et homogène. Le dispositif permet une grande variabilité de débit entre l'hydrogène gazeux et l'hydrogène liquide, ce qui confère une grande adaptabilité aux systèmes de stockage embarqués et à leurs conditions d'utilisation.

Une efficacité énergétique très largement supérieure aux technologies classiques

La figure ci-contre représente l'exemple d'une machine volumétrique de type « compresseur à piston » avec un ensemble piston-bielle-vilebrequin, un cylindre, un système d'injection d'hydrogène liquide LH2, une pompe à palettes destinée à alimenter le compresseur volumétrique par l'intermédiaire d'une lumière d'admission, puis via le canal de transfert afin de comprimer cet hydrogène

gazeux GH2 par la montée du piston du PMB (point mort bas) jusqu'au PMH (point mort haut). Une quantité d'hydrogène liquide préalablement pressurisée par une pompe est injectée à une pression légèrement supérieure à celle de l'hydrogène gazeux au PMH, puis se vaporise au contact de l'hydrogène gazeux. Une petite quantité d'air préalablement comprimée ou prélevée du cycle moteur est introduite et enflammée en activant le système d'allumage, ce qui augmente fortement la pression dans la chambre. Ce prélèvement d'air et cette quantité minimale d'hydrogène consommée ne sont pas perdus, car l'enthalpie résultante de cette précombustion sera réintroduite dans la chambre de combustion du moteur ou du turboréacteur.

Pour maîtriser la forte richesse en hydrogène, la combustion est réalisée dans une chambre de prémélange de type « Ricardo ». Comme le régime de combustion est très riche en hydrogène, la combustion de l'hydrogène est incomplète et la température de combustion faible, ce qui contribue à diminuer les NOx. Le mélange résultant, composé principalement d'hydrogène gazeux, d'azote et d'eau, pressurisé et réchauffé, est évacué par la soupape d'échappement en direction des moteurs ou des piles à combustible. L'efficacité énergétique du « générateur cryogénique d'hydrogène gazeux pressurisé et réchauffé » est très largement supérieure aux technologies classiques de pompes à carburant, dont la puissance est prélevée sur les moteurs.

Son compresseur volumétrique et sa pompe à hydrogène liquide peuvent être entraînés par un ou des moteurs électriques indépendants ou auxiliaires. Lorsque la pression demandée pour l'alimentation du moteur à hydrogène ou de la pile à hydrogène est inférieure à celle de la pression maximale du cycle, il est possible de diminuer le pourcentage d'hydrogène consommé, ou si le moteur électrique est réversible, de récupérer une partie de l'énergie sur l'arbre du compresseur. Le moteur électrique ainsi que d'autres organes mécaniques à proximité du SEPR pourront être refroidis par l'arrivée d'hydrogène et par conséquent, lui apporter une source de chaleur avantageuse dans la partie haute du compresseur.

Dans ces conditions, avec un hydrogène stocké à la pression atmosphérique, introduit gazeux à une température comprise entre 50 et 80 K dans le compresseur volumétrique avec un taux de compression de 10 et pour une consommation maximale de 5 % de l'hydrogène total traité, le ratio des débits massiques de l'hydrogène liquide par l'hydrogène gazeux (DLH2/DGH2) peut varier de 0 à 15. Dans ces mêmes conditions, l'utilisation exclusive d'hydrogène gazeux (DLH2/DGH2 = 0) permet d'obtenir en sortie un carburant à près de 300°C et une pression de plus de 50 bars, un mélange (DLH2/DGH2 = 1) offre un carburant gazeux à plus de 230°C et 100 bars, alors qu'un ratio (DLH2/DGH2 = 10) permettra d'obtenir un flux d'hydrogène gazeux

à 200°C et plus de 500 bars. D'une manière générale, une forte proportion d'hydrogène gazeux est pénalisante pour atteindre de grande pression et une plus forte proportion d'hydrogène liquide pénalisera l'atteinte d'une température supérieure à 100°C, nécessaire à maintenir l'eau à l'état gazeux dans les canalisations d'alimentation en carburant pour le moteur. En augmentant la proportion d'hydrogène consommé, les valeurs de pression et de température augmentent très rapidement.

La configuration de type « deux-temps » avec admission dans le carter en partie inférieure du piston est particulièrement intéressante, car elle permet d'avoir de l'hydrogène gazeux au-dessus et en dessous du piston, et ainsi de diminuer les problèmes d'étanchéité de la segmentation. La vitesse de rotation, la cylindrée et le nombre de cylindres du compresseur volumétrique permettent d'adapter le débit et de régulariser la pression d'injection dans les moteurs avec ou sans stockage gazeux intermédiaire. Le pilotage électronique des soupapes et de l'injecteur offre une très grande plage de réglage. Les brevets déposés par SHZ Advanced Technologies concernent aussi bien des configurations avec des compresseurs volumétriques permettant d'atteindre de très hauts niveaux de pression, que des architectures sur la base de turbomachines qui autorisent de plus forts débits.

La température d'admission de l'hydrogène gazeux dans le compresseur est très sensible. Il convient donc d'utiliser le « générateur cryogénique d'hydrogène gazeux pressurisé » à proximité des réservoirs cryogéniques embarqués ou associés à des lignes cryogéniques d'admission performantes. Afin de maintenir l'hydrogène gazeux à basse température, SHZ Advanced Technologies réfléchit également sur des conduites d'admissions ou des canalisations intermédiaires capables de favoriser et d'accélérer la transformation endothermique du parahydrogène gazeux en orthohydrogène.

La recherche de partenaires industriels chez les équipementiers

Fort de sa dizaine de brevets, la start-up poursuit son déploiement auprès des grands donneurs d'ordre de l'aéronautique, du naval et du ferroviaire, mais recherche également des partenaires industriels chez les équipementiers en vue de codévelopper certains de ses concepts. SHZ Advanced Technologies sera présente au Salon International de l'aéronautique et de l'espace (SIAE) de Paris-Le Bourget, le 19 et le 20 juin, ainsi qu'au salon Horizons Hydrogène les 28 et 29 novembre au centre de congrès Rive Montparnasse, à Paris. ■