

L'HYDROGÈNE VA-T-IL CHANGER NOS VIES ? L'EXEMPLE DE L'AVIATION

Par Thierry POINSOT¹

L'introduction de l'hydrogène dans toutes les politiques publiques actuelles représente une révolution. Même si l'hydrogène est employé depuis longtemps dans l'industrie pour de multiples usages, la multiplication de ses applications va entraîner des modifications importantes dans de nombreux domaines. Un de ces domaines est le transport qui représente, à lui seul, une part considérable des émissions de CO₂. Et parmi les modes de transport, l'aviation, tout particulièrement à Toulouse, est un exemple emblématique. Cet article décrit certains aspects du déploiement éventuel futur de l'hydrogène dans les avions civils.

Le futur de l'aéronautique passe par la conception de nouveaux moteurs et de nouveaux avions capables de voler sans émettre de CO₂. Même si le CO₂ émis par les avions représente seulement 3 % des émissions totales aujourd'hui, l'industrie aéronautique veut continuer ses efforts dans le domaine des performances des avions. Après avoir divisé par quatre la consommation de kérosène des avions par passager et kilomètre parcouru en 40 ans, l'industrie aéronautique européenne s'est donné un nouvel objectif : limiter, voire éliminer l'impact climatique des avions. Pour cela, il faut amener la production de CO₂ des avions à zéro, mais aussi maîtriser les traînées de condensation que nous pouvons tous observer dans le sillage des avions et qui jouent aussi un grand rôle sur le changement climatique, probablement plus fort que le CO₂ relâché dans l'atmosphère, si l'on en croit les résultats les plus récents du GIEC (Lee et al, 2021).

Deux grandes pistes émergent dans ce domaine : la première, remplacer le kérosène par des carburants de synthèse, proches du kérosène mais issus de la biomasse ou d'hydrogène produit par des sources renouvelables ; la seconde, utiliser directement de l'hydrogène dans les moteurs d'avion. L'avion à hydrogène concentre aujourd'hui de nombreux efforts chez AIRBUS comme dans les politiques des gouvernements européens : ne relâchant que de l'eau à la sortie de ses moteurs, il permettrait d'ouvrir une nouvelle ère pour le transport aérien. Bien que ce concept enthousiasme les chercheurs comme les ingénieurs, ceux-ci font aussi remarquer qu'un avion à hydrogène nécessitera de trouver un compromis subtil entre les gains (pas de CO₂ produit) et certaines pertes (traînées de condensation toujours présentes, possibles augmentations de certains polluants bien maîtrisés aujourd'hui avec le kérosène comme les oxydes d'azote, volume des réservoirs, sécurité). Ils pointent surtout les formidables défis technologiques associés à la conception de cet avion.

¹ Communication présentée à l'Académie des Sciences, Inscriptions et Belles-Lettres de Toulouse à la séance du jeudi du 23 février 2023.

Le premier des obstacles pour un avion à hydrogène est certainement le transport de grands volumes d'hydrogène liquide à -253°C qui nécessiteront de transformer les réservoirs en bouteilles thermos géantes. Seul l'hydrogène liquide permet la conception d'un avion assez léger pour voler de façon efficace, mais faire fonctionner un tel avion est extrêmement complexe. La sécurité devra aussi être reconsidérée car l'hydrogène fuit et explose facilement. Ces problèmes sont bien connus dans le domaine des fusées : l'étage principal du lanceur Ariane 5 fonctionne depuis longtemps avec des moteurs Vulcain alimentés en hydrogène et oxygène, tous deux stockés sous forme liquide.

Cependant, les modèles économiques des avions et des fusées ne peuvent être comparés : passer d'une fusée à l'hydrogène à un avion à hydrogène pose des défis d'un tout autre ordre. On notera au passage que l'une des clefs souvent citée du succès de SPACE X est d'avoir préféré le kérosène puis le méthane à l'hydrogène pour ses lanceurs. De même, Ariane volera probablement bientôt avec des moteurs au méthane et non à l'hydrogène. En d'autres termes, quand les avions civils se mettent à l'hydrogène, le spatial, lui, s'en éloigne.

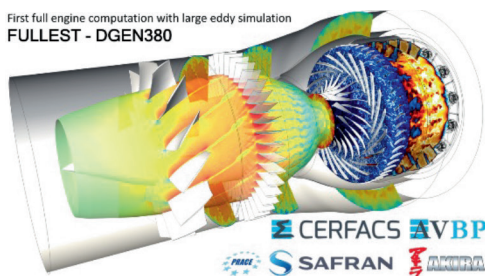
Enfin, un avion à hydrogène ne sera vert que si l'hydrogène qui l'alimente est produit à partir d'énergies renouvelables, ce qui est loin d'être le cas pour le moment. La surface d'éoliennes ou de panneaux photovoltaïques permettant d'alimenter en hydrogène tous les avions de Roissy CDG nécessiterait de couvrir une bonne partie de la région parisienne... ou de construire plusieurs centrales nucléaires supplémentaires : leur électricité décarbonée peut être employée pour produire de l'hydrogène mais ceci est un autre sujet.

Pas d'avion en l'air si son jumeau numérique n'a pas été validé

Indépendamment de ces questions, la conception d'un avion à hydrogène ouvre un champ des possibles immense, qui ne peut être exploré uniquement par des méthodes classiques combinant la conception, l'expérimentation et les essais. La compétition entre motoristes au niveau mondial ne permettra pas de prendre son temps en testant tous les concepts possibles : il faudra vite cibler la technologie la plus prometteuse et ne pas se tromper. Pour cela, la simulation numérique est le nouvel *eldorado* des chercheurs et des ingénieurs : l'objectif actuel des concepteurs de moteurs, c'est « calculer les moteurs avant de les construire ». Une formulation plus précise de leur besoin est en fait : « calculer des dizaines de concepts de moteurs pour éliminer les moins bons et ne construire que le meilleur ».

La bataille du moteur à hydrogène se livre donc non seulement sur la table à dessin (qui a été remplacée elle-même par des outils de Conception Assistée par Ordinateur), mais aussi dans un monde virtuel où les chercheurs construisent des jumeaux numériques des futurs moteurs et sélectionnent les concepts les plus prometteurs. Même si la réalisation de ces jumeaux numériques est un exercice coûteux, elle reste moins chère que la construction d'un vrai moteur et permettrait d'en tester virtuellement des dizaines.

First full engine computation with large eddy simulation
FULLEST - DGEN380



MOTEUR REEL



JUMENTAU NUMERIQUE

Fig. 1 : exemple de jumeau numérique d'un moteur d'avion. Le moteur réel produit par la société AKIRA est installé à l'ISAE (Institut Supérieur de l'Aéronautique et de l'Espace). Son jumeau numérique « vole » dans les superordinateurs utilisés par le CERFACS à Toulouse.

Une bataille dans le monde virtuel de la simulation numérique

La compétition entre motoristes développant des moteurs à hydrogène passe donc par une bataille numérique qui nécessite de super ordinateurs capables de faire ces calculs. Simuler quelques secondes de fonctionnement d'un moteur d'avion nécessite des ordinateurs hors du commun : ils s'achètent pour quelques centaines de millions d'euros, consomment de l'électricité à hauteur de plusieurs dizaines de millions d'euros par an (et plus depuis 2023) et occupent des surfaces au sol de la taille d'un terrain de sport. On y place des millions de processeurs qui travaillent simultanément. Même sur ces ordinateurs, prévoir le fonctionnement d'un nouveau concept de moteur à hydrogène nécessite des temps de calcul cumulés de plusieurs milliers d'années. Une fois partagés entre des milliers de processeurs, les calculs sont effectués en quelques semaines mais restent des défis scientifiques où chaque calcul coûte des centaines de milliers d'euros. C'est beaucoup..., mais beaucoup moins que de développer un moteur et se rendre compte pendant les essais qu'il n'est pas assez performant.

Les super ordinateurs sont aujourd'hui parallèles et utilisent les mêmes processeurs que les microordinateurs personnels. D'autres révolutions arrivent cependant et demain les superordinateurs pourraient être quantiques et utiliser l'Intelligence Artificielle comme prévu dans le projet Pack de GENCI (Grand Equipement National de Calcul Intensif) qui est le fer de lance du calcul à haute performance en France.

Découper le moteur en des milliards de petits éléments

Même si leur mise en application est bien plus complexe, le principe des calculs de mécanique des fluides est simple et chacun l'applique tous les jours à son porte-monnaie : vous savez combien d'argent vous aviez le matin, combien vous avez dépensé et gagné pendant la journée. Donc après 24 heures, vous savez combien d'argent se trouve sur votre compte. Vous effectuez ainsi un bilan sur un pas de temps de 24 heures. Les chercheurs font le même type de bilan, mais au lieu de compter des euros, ils comptent des masses, des impulsions, des espèces chimiques et de l'énergie. Et au lieu de le faire sur un portefeuille, ils le font sur de minuscules éléments couvrant tout l'espace du moteur : les mailles. Quand on sait faire le bilan d'une maille et que le moteur entier a été maillé, on sait reproduire son comportement sans avoir à le construire. Plus

les mailles sont petites, plus on peut prévoir l'effet de tous les détails du moteur. Des maillages de plusieurs milliards d'éléments sont devenus communs aujourd'hui. Un code de mécanique des fluides n'aurait aucune difficulté à faire le bilan simultané des portefeuilles de tous les humains.

Enfin, au lieu de faire le bilan une fois par jour, les codes de calcul le font 100 millions de fois par seconde. Ainsi une simulation génère environ 10^{16} (10 millions de milliards) nombres (les vitesses, températures, compositions en chaque point du maillage) qu'il faut ensuite traiter et stocker. Cette tâche titanesque n'est possible que sur les super ordinateurs où des centaines de milliers de cœurs de calcul travaillent ensemble au même calcul. Tous ces cœurs sont dépendants et doivent être coordonnés : quand vous touchez de l'argent, un de vos voisins doit vous l'avoir donné. Hors de question de le compter deux fois : il faut donc communiquer entre tous les cœurs de calcul pour que tout s'équilibre. Une analogie adéquate serait celle d'un orchestre de 100 000 musiciens qui, à chaque note, devraient se mettre d'accord sur la note suivante : la tâche fait appel aux meilleurs experts, venus de toutes les disciplines scientifiques, groupés dans des équipes de 10 à 100 personnes. Les codes typiques comportent un million de lignes de programmation et ont un cycle de vie de plusieurs dizaines d'années.

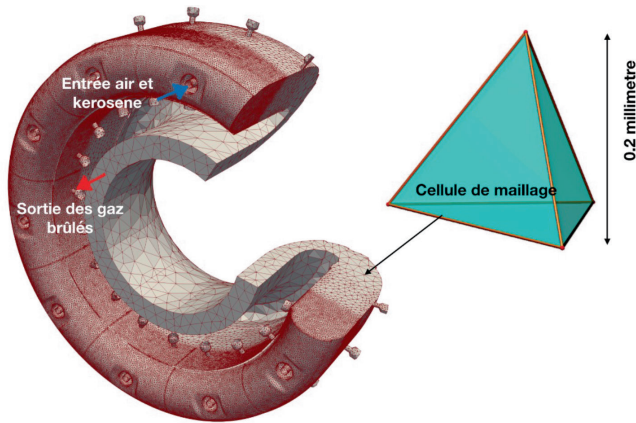


Fig. 2 : maillage d'une chambre de combustion d'hélicoptère. Chaque petit tétraèdre sert à faire les bilans plusieurs millions de fois par seconde. Il faut des centaines de millions de tétraèdres de quelques fractions de millimètres de côté pour couvrir l'ensemble du moteur.

Dans le monde virtuel, tout est permis

Grâce à la simulation on peut explorer des concepts nouveaux à coût et risque réduits. Parmi les concepts les plus radicaux, le monde de la recherche en combustion explore l'idée d'un « moteur à détonation tournante » qu'on pourrait résumer en disant : créons dans la chambre de combustion, non pas une flamme « normale » qui se propage à environ 2 km/h mais une explosion supersonique où la flamme avance à 6000 km/h. C'était impossible avec le kérosène mais cette performance devient possible avec de l'hydrogène. La difficulté des moteurs à détonation est de garder le contrôle de la flamme : la méthode retenue est de la confiner en la faisant tourner en rond dans un espace annulaire où elle repasse au même endroit plusieurs milliers de fois par seconde. De tels moteurs existent déjà dans les laboratoires chinois, russes, européens

et américains et bien sûr dans leurs ordinateurs. Les gains attendus sur le rendement sont de 10 à 20 %, ce qui constituerait une vraie révolution dans le domaine des moteurs.

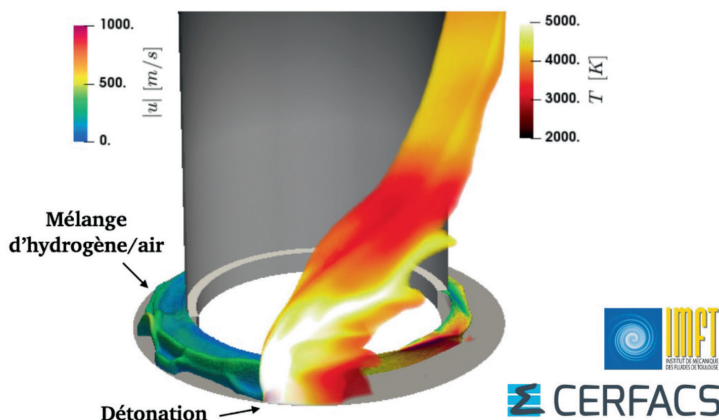


Fig. 3 : Simulation d'un moteur à détonation tournante, adapté à la combustion de l'hydrogène. La détonation tourne en rond dans un espace annulaire et consomme l'hydrogène mélangé à l'air à plus de 6000 km/h. Elle tourne ici dans le sens des aiguilles d'une montre et quand elle revient à sa place initiale, le système d'injection a réinjecté l'hydrogène et l'air nécessaires pour qu'elle puisse continuer sa rotation.

De tels moteurs ne voleront pas avant des dizaines d'années mais, alimentés avec de l'hydrogène bas carbone, ils pourraient nous permettre de continuer à voler sans modifier le climat. En attendant ce moment, c'est dans nos ordinateurs que nous les verrons décoller !

Bibliographie

Lee, D S, et *al.*, «The contribution of global aviation to anthropogenic climate forcing for 2000 to 2018 », *Atmospheric Environment*, 2021, 244, 117834.

AIRBUS et les avions à hydrogène : <https://www.usinenouvelle.com/article/en-images-airbus-devoile-un-nouveau-design-d-avion-a-hydrogene.N1041184>

Le calcul quantique arrive en France : <https://www.genci.fr/fr/node/1079>

Le jumeau numérique du moteur ISAE : <https://www.hpcwire.com/2020/07/14/joliot-curie-supercomputer-used-to-build-first-full-high-fidelity-aircraft-engine-simulation/>

