

# IDÉES

## L'AVION DU FUTUR VOLERA D'ABORD DANS UN SUPER-ORDINATEUR

Pour limiter, voire éliminer l'impact climatique du transport aérien, le moteur à hydrogène est une piste d'avenir qui pose de formidables défis technologiques. C'est sur le terrain numérique, explique **Thierry Poinot**, que se livre la bataille pour sa conception.

**L**e futur de l'aéronautique passe par la conception de nouveaux moteurs. Même si le CO<sub>2</sub> émis par les avions ne représente que 3 % des émissions totales, l'industrie aéronautique veut continuer ses efforts dans le domaine des performances des avions. Après avoir divisé par quatre la consommation des avions par passager et kilomètre parcouru en quarante 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 CO<sub>2</sub> des avions à zéro mais aussi maîtriser

### MÉCANIQUE DES FLUIDES

Dans le cadre de notre partenariat avec l'Académie des sciences, les académiciens nouvellement élus fin 2019 présentent un éclairage sur leur discipline et ses enjeux scientifiques, éthiques, politiques et sociétaux, à travers leur expérience personnelle.

les traînées de condensation que nous observons dans le sillage des avions et qui jouent un grand rôle dans le changement climatique, probablement plus fort que le CO<sub>2</sub> relâché dans l'atmosphère, d'après les résultats les plus récents du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (Giec).

Deux grandes pistes émergent dans ce domaine : soit remplacer le kérosène par des carburants de synthèse, proches du kérosène mais issus de la biomasse ou d'hydrogène produit par des sources renouvelables, soit utiliser directement de l'hydrogène dans les moteurs d'avion. L'avion à hydrogène concentre

aujourd'hui de nombreux efforts : 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 chercheurs et ingénieurs, ceux-ci font aussi remarquer qu'un avion à hydrogène impliquera de trouver un compromis subtil entre les gains (pas de CO<sub>2</sub> 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 challenges technologiques associés à la conception de cet avion.

Le premier des obstacles pour un avion à hydrogène est le transport de grands volumes d'hydrogène à - 253 °C, qui nécessiteront de transformer les réservoirs en bouteilles Thermos géantes. La sécurité devra aussi être reconsidérée, car l'hydrogène fuit et explose facilement. Ces problèmes sont bien connus dans le domaine des fusées, et l'étage principal du lanceur Ariane 5 fonctionne depuis longtemps avec des moteurs Vulcain alimentés en hydrogène et en 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 hydrogène à un avion à hydrogène pose des défis d'un autre ordre. Au passage, notons que l'une des clefs souvent citées du succès de SpaceX est d'avoir préféré le kérosène puis le méthane à l'hydrogène pour ses lan-



## PROFIL

Directeur de recherche au CNRS à l'Institut de mécanique des fluides (Toulouse), **Thierry Poinsot** est membre de l'Académie des sciences. Spécialiste de la combustion – qui fournit 90 % de l'énergie mondiale – et pionnier de la simulation numérique dans ce domaine, ses travaux sont cruciaux pour l'aéronautique, confrontée aux défis de la transition énergétique.

ceurs. 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 l'aéroport Roissy-CDG demanderait d'en 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 c'est un autre sujet.

## UN CHAMP DES POSSIBLES IMMENSE

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 ». Et, plus précisément : « 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 (remplacée 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 coûteuse, elle reste moins chère que la construction d'un vrai moteur et permet d'en tester virtuellement des dizaines.

## UNE FURIEUSE COMPÉTITION

La compétition entre motoristes passe donc par une bataille numérique qui nécessite des super-ordinateurs. Simuler quelques secondes de fonctionnement d'un moteur d'avion exige 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 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 demande 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 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 votre micro-ordinateur personnel. D'autres révolutions arrivent cependant et, demain, les super-ordinateurs pourraient être quantiques et utiliser l'intelligence artificielle, comme cela est prévu dans le projet pack de Grand Équipement national de calcul intensif (Genci), fer de lance du calcul à haute performance en France. )))

**Simuler quelques secondes de fonctionnement d'un moteur d'avion exige des ordinateurs hors du commun de plusieurs centaines de millions d'euros, et qui occupent des surfaces au sol de la taille d'un terrain de sport.**

**Grâce à la simulation, on peut explorer des concepts nouveaux à coût et risques réduits. Parmi les plus radicaux, le monde de la recherche en combustion explore l'idée d'un « moteur à détonation tournante ».**

**))) DES CALCULS TITANESQUES**

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 : 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 qui couvrent 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 (voir l'illustration ci-contre). 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 10 millions de fois par seconde. Ainsi, une simulation génère environ  $10^{16}$  (10 millions de milliards de) nombres (les vitesses, températures, compositions en chaque point du maillage) qu'il faut traiter et stocker. Cette tâche titanesque n'est réalisable que sur les super-ordinateurs, où des centaines de milliers de processeurs travaillent ensemble au même calcul. Tous ces processeurs 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 les processeurs 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, de toutes les disciplines scientifiques, groupés dans des équipes de 10 à 100 personnes, car ces codes comportent 1 million de lignes de programmation et ont un cycle de vie de plusieurs dizaines d'années.

**UNE FLAMME À LA VITESSE DE 6 000 KM/H**

Grâce à la simulation, on peut explorer des concepts nouveaux à coût et risques réduits. Parmi les concepts les plus radicaux, le monde de la recherche en com-

bustion explore l'idée d'un « moteur à détonation tournante » qu'on pourrait résumer ainsi : 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 6 000 km/h. C'était impossible avec le kérosène, mais cette performance devient possible avec de l'hydrogène.

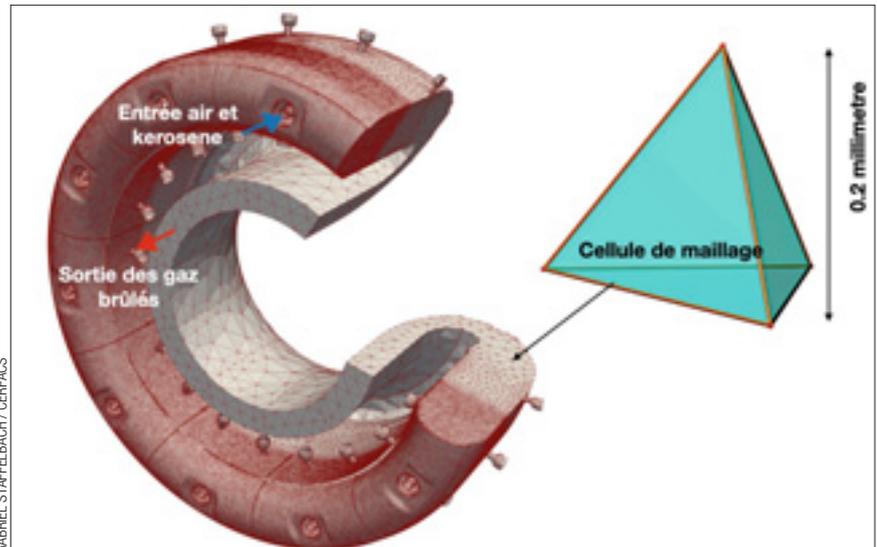
La difficulté des moteurs à détonation est de garder le contrôle de la flamme : la méthode retenue est de la confiner en la faisant tourner en rond dans un espace annulaire, où elle repasse au même endroit plusieurs milliers de fois par seconde. De tels moteurs existent déjà dans les laboratoires chinois, 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.

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, c'est dans nos ordinateurs que nous les verrons décoller ! ★

Le site de l'Académie des sciences : [WWW.ACADEMIE-SCIENCES.FR](http://WWW.ACADEMIE-SCIENCES.FR)

« La simulation en combustion, clef de l'énergie au XXI<sup>e</sup> siècle », intervention de T. Poinso à la conférence-débat « Les simulations "frontières" en mécanique des solides et des fluides » de l'Académie des sciences, 9 mai 2017. À visionner sur [www.youtube.com/watch?v=kq40cwXUzIY](http://www.youtube.com/watch?v=kq40cwXUzIY)

« Airbus dévoile un nouveau design d'avion à hydrogène », de R. Epitropakis, « l'Usine nouvelle », 17 décembre 2020 : [www.usinenouvelle.com/article/en-images-airbus-devoile-un-nouveau-design-d-avion-a-hydrogene.N1041184](http://www.usinenouvelle.com/article/en-images-airbus-devoile-un-nouveau-design-d-avion-a-hydrogene.N1041184)



**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 millimètre de côté pour couvrir l'ensemble du moteur.**