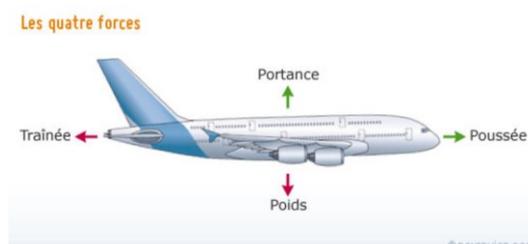


MAGGIE ou l'aviation hybride pour l'exploration martienne ?

« Wings, Venus & Mars »

Début 1800¹, l'ingénieur anglais (et futur aviateur) George Cayley, devinait un siècle avant les frères Wright que quatre forces dictent les conditions du vol d'un aéronef dans l'atmosphère : le poids, la poussée, la trainée, et la portance².



Mais ensuite, pour voler, encore faut-il trouver les moyens de combiner les effets de ces forces qui s'opposent, tout particulièrement les forces de gravité vis-à-vis de la portance induite par les ailes d'un aéronef en mouvement. Laquelle fait toute la différence... entre une automobile et un avion ! Et cet équilibre dépend en bonne partie de la densité de l'atmosphère et du champ de gravité dans lesquels s'effectue le vol.

Sur Terre, le vol atmosphérique est devenu banal en cinquante ans d'histoire aéronautique et le vol spatial suit le même chemin. En revanche, **le vol dans des atmosphères autres que celles de la Terre reste exceptionnel** ; on a seulement en tête les vols d'exploration du petit hélicoptère **Ingenuity** sur Mars³ (2021-2023) ou ceux de quelques rares ballons.

¹ [George Cayley](#)

² La **portance** résulte de la circulation de l'air autour d'une aile ; lors du vol, le profil asymétrique de l'aile provoque une dépression sur l'extrados (face supérieure de l'aile) et une surpression sur l'intrados (face inférieure de l'aile). Cet aérodynamisme fait toute la différence...

Dans le vide, seules subsistent le poids/attraction gravitationnelle et la poussée, et les moyens de se propulser dans l'Espace ont été découverts en 1810 par William Moore, puis redécouverts et développés en 1896 en particulier par un érudit russe, Konstantin Tsiolkovsky, autodidacte sourd et reclus, inspiré par la lecture de Jules Verne !

³ Avec un **1^{er} vol historique sur Mars le 19 avril 2021** (voie déjà ouverte cependant par le [système d'atterrissage martien Sky Crane](#), d'une technologie différente et capable d'un court vol stationnaire sur Mars après rentrée atmosphérique pour déposer en douceur des charges utiles à la surface de Mars (les rovers Curiosity et Perseverance). Ce système spatial Sky Crane a d'ailleurs lui-même été inspiré, dans son principe et à l'origine, par un hélicoptère de transport lourd américain, le [Sikorky S-64 Skycrane](#)).



L'hélicoptère martien Ingenuity en chiffres. Image Crédits NASA

Ni avion, ni navette, ni capsule - ce qui peut surprendre -, **Ingenuity prend la forme très familière d'un drone « hélicoptère »**. **Mais pourquoi pas celle d'un avion, d'un planeur ou d'un ballon comme pour les premiers vols terrestres ?**

Une raison peut-être : les caractéristiques atmosphériques de Mars, peu favorables au vol globalement ; la densité et la pression de son atmosphère très fine, composée principalement de CO₂, sont significativement plus faibles que sur Terre (respectivement 60 et 160 fois plus faibles) et varient de plus significativement avec les saisons^{4,5}, l'altitude⁶ ou encore... l'heure de la journée. Dans ces conditions, un **concept d'avion « terrestre » sur Mars** devrait atteindre et conserver lors de ces évolutions une vitesse de vol horizontal très élevée⁷ pour y obtenir la portance nécessaire à un vol, ce qui handicaperait alors notablement sa pilotabilité. De même, les **concepts de ballon d'exploration** (outre la fragilité de leur enveloppe et leur faible pilotabilité) impliquent des volumes importants et d'assez grandes dimensions et doivent exploiter des phénomènes thermiques^{8,9} pour évoluer dans une atmosphère peu dense.

⁴ [La composition de l'atmosphère martienne \(du CO₂ principalement\), et ainsi sa densité et sa pression atmosphérique varient avec la fixation du CO₂ \(par condensation\) en hiver au niveau de chacune des calottes polaires.](#)

⁵ La masse de la -fine- atmosphère martienne exerce [6.1 mbar](#) de pression en moyenne sur la surface de la planète, contre 1013 mbar (ou hectoPascal) sur Terre (0.6%). Sa densité est de 1.5% de celle de l'atmosphère de la Terre au niveau de la mer.

⁶ 12 mbar par exemple en fond de cratère à 8 km de profondeur et 0,3 mbar à 21 km d'altitude au sommet d'Olympus Mons

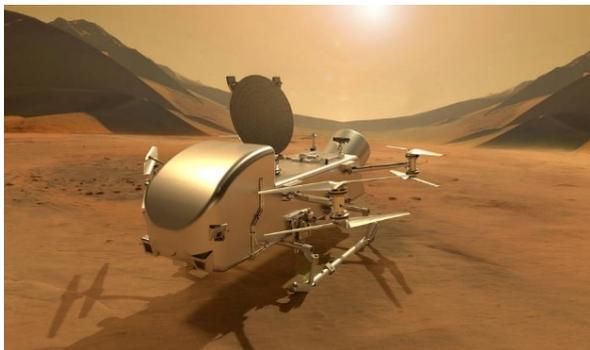
⁷ Pour une illustration : <https://www.businessinsider.com/how-to-fly-a-plane-on-other-planets-2016-2>

⁸ Voir le concept de ballon martien sur le projet (abandonné) de la mission soviétique [Mars 94](#).

⁹ Mais des ballons sondes (d'inspiration CNES !) ont bien volé dans l'atmosphère dense de Venus dans le cadre des missions soviétiques Vega dans les années 80.

Même pour un **concept de drone hélicoptère**, l'affaire n'est pas si simple : la vitesse du son sur Mars est inférieure à celle de la Terre – ce qui réduit la vitesse de rotation maximale possible pour les hélices¹⁰ et donc la portance par hélice... Si Ingenuity a pu voler sur Mars¹¹, c'est que ses hélices d'un mètre vingt de diamètre tournaient à une vitesse comparable à celle d'hélices sur Terre¹², mais dans seulement un tiers de la gravité terrestre. En prime, ses deux rotors juxtaposés en contra-rotation augmentaient sa stabilité à basse vitesse et amélioraient légèrement la portance, au prix d'un peu plus de masse. Et le profil de ces hélices n'est pas conventionnel mais adapté¹³ pour mieux exploiter les flux d'une atmosphère moins dense ; tout comme le panneau solaire d'Ingenuity est optimisé pour le spectre solaire martien¹⁴.

Pour la mission **Dragonfly** sur Titan à l'horizon 2028 (gravité réduite, atmosphère d'azote 4 fois plus dense que celle de la Terre cette fois, grande distance au Soleil), le trade-off s'est conclu en faveur d'un **quadri-rotor lourd** (850kg) à double hélice de 1 m de diamètre, rechargé par générateur thermo-électrique à radioisotope. Il serait capable de déplacements de l'ordre de 60 km maximum à une vitesse d'environ 30 ou 40 km/h.



Vue d'artiste du concept Dragonfly prévu pour une mission NASA vers Titan en 2028.
Images NASA.

Mais les hélicoptères ne traversent pas les océans

Ingenuity, tout comme Dragonfly, a été construit et testé dans le but¹⁵ d'étendre progressivement les zones explorées par les rovers. Le petit drone Ingenuity aura ainsi parcouru 17 km en un peu plus de 2 heures de vol, soit l'équivalent de la distance couverte

¹⁰ Lorsque la pointe d'une hélice approche la vitesse du son, une onde de choc se forme, ce qui génère bruit et vibrations. Voir l'aventure de l'avion à hélice [XF-84H](#). Une petite hélice pourra tourner plus vite, une grande plus lentement, afin que les pointes restent toujours sous la vitesse du son.

¹¹ Ingenuity a terminé sa mission après son 72^{ème} vol (pour 5 prévus initialement) sur avarie avec l'endommagement à l'atterrissage de pales de l'un de ses rotors.

¹² Environ 2600 tours par minute.

¹³ A plus faible densité et même vitesse, les écoulements autour de l'hélice restent laminaires et se détachent sans turbulences. Or si les turbulences réduisent la vitesse, elles jouent au final favorablement sur la portance (comme les trous sur les balles de golf). Voir notamment une étude NASA sur ce sujet [ici](#).

¹⁴ <https://science.nasa.gov/resource/mars-helicopters-solar-array-as-seen-by-perseverances-mastcam-z/>

¹⁵ « [NASA developed the Ingenuity Mars Helicopter to improve upon the range, mobility, and three-dimensional exploration capability of rovers and landers used in previous Mars missions](#) »

par le rover Perseverance en 730 jours. Mais, au-delà d'un premier test, ce choix est peu compréhensible, puisque les hélicoptères sont gourmands en énergie. La raison d'être de ces voilures tournantes vient en effet surtout de leur **capacité à manœuvrer en vol stationnaire, et à décoller et atterrir verticalement**¹⁶ ; mais pour la même énergie consommée, les avions à voilure fixe vont plus loin, plus haut, et emportent plus de charge.

Les deux capacités s'avèrent nécessaires dans certaines situations, et - cette approche est de mieux en mieux maîtrisée - **de nombreuses conceptions**¹⁷ **hybrident désormais les technologies pour permettre à la fois la liberté du décollage-atterrissage vertical et l'efficacité en vol de la voilure fixe.**

Sur Mars, où toute une planète reste à explorer sur de très longues distances, sans la moindre piste d'aérodrome... cette hybridation serait assez bienvenue.

Et ...voilà MAGGIE

Parmi les **financements d'innovation de la NASA en 2024**, se trouve un *avion hybride* de ce type, qui devrait terminer sous peu sa première phase d'étude : le projet **MAGGIE**¹⁸. La première phase d'étude de ce concept a été dotée¹⁹ en janvier 2024 de 144 000 \$ de financement NIAC²⁰ dit de « Phase I » (donc très modeste).

MAGGIE est un concept d'avion solaire à voilure fixe (32 m d'envergure tout de même) **et à hélices contrarotatives**, qui vise une capacité de **décollage et d'atterrissage verticaux** et de vol dans l'atmosphère martienne à la mi-2030.

Sans surprise, son allure ressemble fort à celle des avions solaires de la haute atmosphère terrestre : Helios²¹, Zephyr²²...

¹⁶ Très pratique en montagne, en mer, ou en ville, lorsque la construction d'une piste est malaisée.

¹⁷ Comme sur cet avion de transport hybride, le [MV22 Osprey](#)

¹⁸ MAGGIE : **Mars Aerial and Ground Global Intelligent Explorer.**

¹⁹ Voir [ici](#).

²⁰ NIAC : NASA Innovative Advanced Concepts

²¹ [Prototype d'avion solaire de la NASA \(1999\)](#)

²² Gamme d'avions solaires/plateformes de haute altitude détenant plusieurs records de durée de vol (> 50 jours) et d'altitude (> 20 km). Le projet a été racheté à QinetiQ par Airbus Defense and Space en 2013 et intégré à sa filiale AALTO dédiée aux High Altitude Platform Stations (HAPS), laquelle vient de [franchir un jalon réglementaire au Royaume-Uni](#) et de [lever 100 M US\\$ auprès d'un consortium d'investisseurs japonais](#).



Le prototype d'avion solaire NASA Helios.
Image NASA



Avion Zephyr de Airbus-QinetiQ. Image
Airbus Defense and Space.



Vue d'artiste du concept d'avion hybride MAGGIE. Image NASA.

De très **longues ailes de planeur**, une structure très légère, de **nombreuses petites hélices**, une alimentation par **panneaux solaires sur toute la surface exposée**... Atterrissage et décollage verticaux seraient rendus possibles par la déflexion du jet des **14 paires d'hélices** de l'engin.

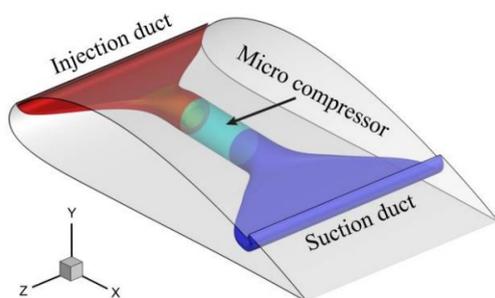
Les missions de MAGGIE pourraient concerner **l'étude locale du faible champ magnétique martien**, la **recherche de traces et sources de méthane** dans le cratère Gale, ou encore la **cartographie de glace d'eau souterraine**.

Côté performances et avec toute la réserve requise à ce stade très amont, le projet annonce une portée sur Mars de 180 km avec une évolution à environ 200 km/h²³ à une altitude de 1km ; l'autonomie de MAGGIE serait de 8 jours martiens. La charge utile embarquée n'est pas précisée.

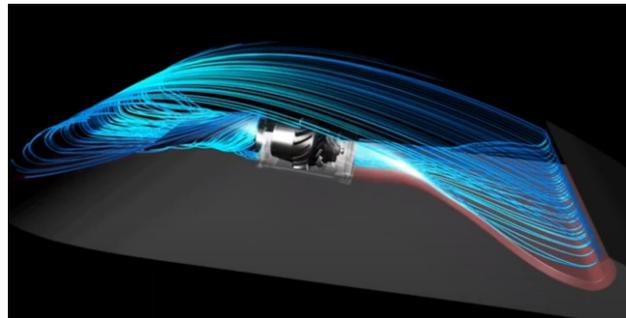
En plus de bâtir sur les données collectées par les vols d'Ingenuity, et sur les avions stratosphériques, solaires ou non, MAGGIE proposera une « nouvelle²⁴ » technologie, le « **CoFlow Jet** », qui pourrait rendre possible le vol d'une voile fixe sur Mars, sans pour autant s'infliger une envergure de terrain de football²⁵.

Le « **CoFlow Jet** » ajoute de petits compresseurs électriques à l'intérieur des ailes, dont le rôle consiste à créer un circuit d'« air » (martien !) :

- En aspirant de l'air au trois-quart arrière de l'extrados de l'aile (« suction »),
- Puis, en comprimant cet air à la volée,
- Et finalement en le réinjectant dans le bord d'attaque de l'aile (« injection »).



Principe de la technologie CoFlow Jet dans une aile portante



Circulation d'air autour de l'aile sous l'effet de l'aérodynamique et dans l'aile (aspiration, compression, réinjection)

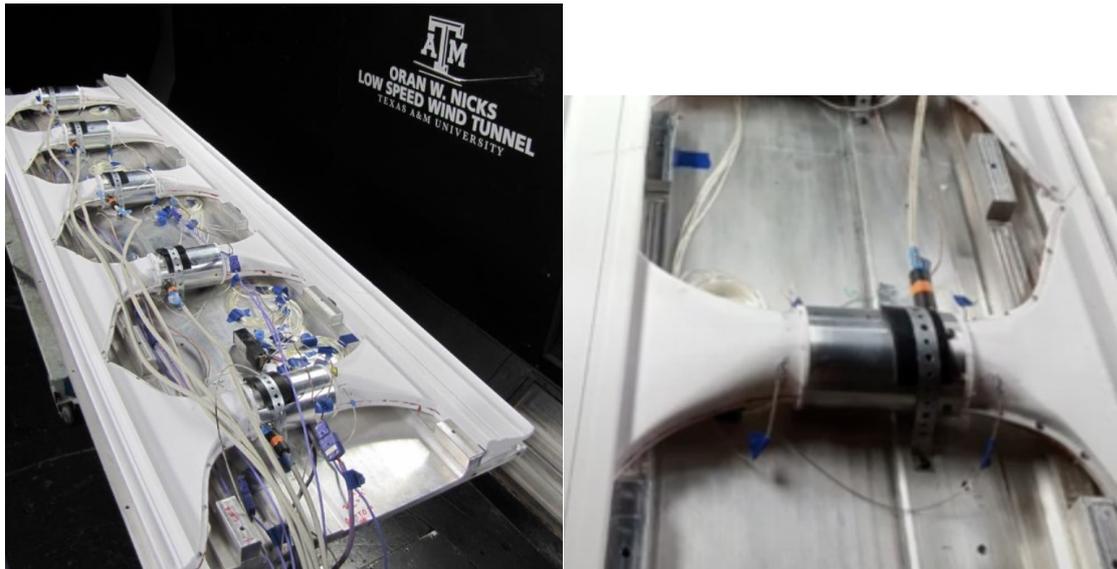
L'aspiration en partie arrière de l'aile réduit la traînée et la réinjection, sur l'avant de l'aile, augmente artificiellement le « bombement » de l'aile et donc la portance à faible vitesse²⁶.

²³ Une vitesse très élevée, à laquelle il faudra réussir à piloter MAGGIE

²⁴ Présentée il y a une vingtaine d'années, et raffinée depuis.

²⁵ Dans une atmosphère peu dense, et à vitesse lente, de grandes ailes allongées améliorent la portance et la manœuvrabilité, raison pour laquelle les avions espions U2 (volant à 21km en haute altitude, dans une atmosphère raréfiée, possèdent une envergure de plus de 30 mètres. Les planeurs de grande finesse bénéficient aussi de cette portance accrue pour planer sur de grandes distances en perdant peu d'altitude : en air calme, ils peuvent parcourir 60km en perdant 1000m d'altitude. Helios avait une envergure de 75 mètres et volait à 29km d'altitude.

²⁶ L'aspiration est originale. En revanche, injecter de l'air dans la couche limite par des trous dans l'aile est pratiqué depuis longtemps, par ex. par le « *Boundary Layer Control System* » du F104 StarFighter, qui, en nourrissant le flux au-dessus de l'aile, lui permettait d'atteindre des vitesses assez lentes pour atterrir.



Un prototype d'aile équipée d'un système Coflow en essai

Avant d'être proposée par une société commerciale, des travaux de recherche sur cette technologie avaient été financés par la DARPA²⁷, la NASA, l'Air Force, la National Science Foundation... indice d'un intérêt stratégique à la fois très large, et impliquant significativement le secteur de la défense.

MAGGIE : volera, volera pas ?

Malgré des financements et un pedigree prestigieux, on peut noter que les perspectives applicatives du « *Coflow* », pour lequel les premières publications applicatives datent pourtant de plus de trois ans, n'ont donné lieu à ce jour à **aucun prototype** (publiquement connu), en dépit d'espérances qui remontent elles au moins à 2018²⁸.

On peut conjecturer que la NASA opère, via son dispositif de financement NIAC, une **revisite opportuniste** de la technologie qui sous-tend ce concept, technologie un peu maturée et ayant fait l'objet d'essais terrestres depuis ces vingt dernières années²⁹ ; pour sa part, la **DARPA** semble ne pas abandonner et vouloir approfondir le **contrôle de vol d'un engin à voilure fixe par injections d'air**³⁰, ce qui laisse deviner que certaines technologies utiles à MAGGIE sont d'ores et déjà regardées, étudiées ou éprouvées, dans le cadre d'autres projets.

Sur un plan pratique, le nombre de micro-compresseurs, leur masse, leur vitesse de rotation, la stabilité et robustesse de la boucle de réinjection d'air forment autant de facteurs qui détermineront la faisabilité du concept et la naissance d'un prototype.

Toutefois, au-delà de la technologie « *Coflow* » les défis les plus difficiles seront sans doute ceux de la **performance énergétique** et de la **capacité de MAGGIE** et de sa **robustesse**

²⁷ Voir cette [vidéo](#) du promoteur de la technologie CoFlow Jet à l'université de Miami

²⁸ Voir cette [vidéo](#) du promoteur de la technologie CoFlow Jet à l'université de Miami

²⁹ Une [première publication](#) est datée de 2004.

³⁰ Voir l'ambitieux projet [X-65](#)

aux environnements, sur une planète plus éloignée du Soleil que la Terre, beaucoup plus froide par moments³¹, et de surcroît dont l'aérologie courante est méconnue, ou bien sujette à des « orages » et tornades de poussière.

Réaliser des vols longs voire permanents, comme le font les avions solaires sur Terre, la durée d'une journée martienne étant sensiblement la même³², impliquera de recharger en journée et de voler sur batterie la nuit, avec des performances et solutions à trouver pour :

- le rendement des panneaux solaires,
- la protection de ces panneaux contre la poussière,
- la capacité et la densité des batteries,
- l'efficacité des systèmes de réchauffage, dans des nuits à -130°C.

Si MAGGIE démontre une **capacité en charge utile convenable** et voit effectivement le jour, il semble très probable de voir d'abord émerger un concept d'avion volant surtout en journée, mais posé au sol la nuit.

Et puis, malgré ces difficultés techniques stimulantes, qu'Ingenuity a déjà en partie aplanies, si le programme passe aux phases II puis III, le principal obstacle (et il est de taille) sera encore de concevoir une **voilure déployable** pour le lancement et le voyage vers Mars de MAGGIE, de designer une mission de dépose au sol de l'engin et d'**opérer et piloter sur Mars en aveugle et en temps différé un avion** (intrinsèquement instable bien qu'hybride ici, mais aussi plutôt rapide pour un moto-planeur), aux dimensions inédites pour un véhicule d'exploration martien.

La **flexibilité ou non du design**, notamment dans la perspective d'un démonstrateur ultra-léger à échelle réduite (à l'instar d'Ingenuity), sera sans aucun doute un facteur clé pour le progrès de ce concept d'avion hybride d'exploration.

Rédaction :

Steven Andlauer (consultant)

Sébastien Lombard (CNES)

³¹ Voir cette [analyse NASA](#) de l'utilisation de l'énergie solaire en environnement martien.

³² 39 minutes de plus, et un équilibre jour-nuit moitié moitié environ