



Association Aéronautique
Astronautique de France

LA SOCIÉTÉ SAVANTE DE L'AÉRONAUTIQUE ET DE L'ESPACE

A decorative graphic on the left side of the page features several concentric, semi-circular arcs in shades of gray, emanating from a stylized human figure. The figure is composed of simple geometric shapes: a circle for the head, a vertical line for the neck, and a series of lines forming the torso and legs.

TABLE RONDE 3AF / SEIN / Alumni - ONERA
LES NOUVELLES MOBILITÉS
17 novembre 2021

Articles parus dans la Lettre 3AF

SOMMAIRE

Préface	5
<i>Bruno Chanetz, président du Haut conseil scientifique</i>	
MOBILITÉ A LA DEMANDE, MOBILITÉ URBAINE AÉRIENNE ET MOBILITÉ AÉRIENNE AVANCÉE	6 - 14
<i>Henry de Pinval, Jean Hermetz et Arnaud Le Pape, ONERA</i>	
MOBILITÉ AÉRIENNE INTERURBAINE ET AÉRODYNAMIQUE OPTIMISÉE	15 - 16
<i>Benjamin Deveaux, Avions Mauboussin</i>	
UN NOUVEAU CONCEPT : LE S-UAM OU PROCHE VÉHICULE URBAIN AÉRIEN	17 - 20
<i>Michel Aguilar, Commission technique Aviation légère</i>	
L'ENJEU DE LA SÉCURITÉ ET DE LA PRÉSERVATION DE VIE DANS LE DÉPLOIEMENT DE LA MOBILITÉ AÉRIENNE INTERURBAINE	21 - 24
<i>Arnaud Violland, Co-fondateur et Président Directeur Général de SAFETYNSAS</i>	
LES BATEAUX QUI VOLENT	25 - 27
<i>Philippe Perrier, Commission technique Aérodynamique</i>	

PRÉFACE



La voiture volante a fait rêver les enfants. Qui ne se souvient de Fantomas s'envolant dans les années 70 à bord d'une DS dont les ailes se déploient, laissant ses poursuivants – Jean Marais et Louis de Funès – au sol dans leur Jeep ? Mais comme toujours l'origine est bien plus ancienne. Il y a déjà un siècle, en 1921, René Tampier présentait au 7^{ème} salon de l'aéronautique au Grand-Palais son avion-automobile, un biplan aux ailes rétractables, convertible en automobile, roulant la queue en avant et l'hélice en arrière.

Le secteur de la mobilité urbaine aérienne est en ce moment en pleine effervescence. Choose Paris Region, l'agence de promotion et d'attractivité internationale de la Région Île-de-France, la RATP et les Aéroports de Paris (ADP) ont lancé un appel d'offre pour développer la mobilité urbaine aérienne. Des industriels, tels qu'Airbus et Dassault Aviation, et des start-up ont été sélectionnés, en tout trente entreprises spécialisées, pour mener des expérimentations sur l'aérodrome de Pontoise. Pour les Jeux Olympiques de 2024, il est prévu des démonstrations d'avions à décollage et atterrissage vertical (VTOL).

C'est dans ce contexte qu'Arnaud Lepape, Henry de Plinval et Jean Hermetz (ONERA), présentent la problématique de la mobilité à la demande (ODM), de

la mobilité urbaine aérienne (UAM) et de la mobilité aérienne avancée (AAM), dont le projet d'avion électrique Ampere de l'ONERA est une illustration, tout comme l'Avion Mauboussin, conçu par David Gallezot et présenté dans ce recueil par Benjamin Deveaux.

Michel Aguilar revient dans ce fascicule sur X-plorair, un s-UAM ou proche véhicule urbain aérien, pour lequel il propose un nouveau concept de moteur : le thermoréacteurTM, un moteur où la combustion se fait à volume constant.

Arnaud Violland dévoile la vision portée par SAFETYTM à travers le projet « Fly SkyNestTM » de mobilité aérienne interurbaine à hauts niveaux de sécurité et sûreté aérienne, concept dévoilé lors de la préparation de l'Expo Dubai 2020 et qui pourrait bien trouver une concrétisation pour les JOs Paris 2024.

Enfin Philippe Perrier traite d'un autre type de mobilité urbaine dans un article sur les hydroptères, ces bateaux qui volent, à l'origine d'une application novatrice : les taxis fluviaux.

Bruno Chanetz

président du Haut conseil scientifique

AÉRONAUTIQUE

MOBILITÉ À LA DEMANDE, MOBILITÉ URBAINE AÉRIENNE, ET MOBILITÉ AÉRIENNE AVANCÉE

par Henry de Pinval, Jean Hermetz et Arnaud Le Pape, ONERA

CONTEXTE ODM, UAM ET AAM

La mobilité à la Demande (ODM pour *On-Demand Mobility*) est actuellement en plein essor dans le monde aéronautique. Ce nouveau concept d'emploi est né de l'opportunité constituée par le développement de technologies hybrides électriques pour la propulsion et des progrès faits dans le domaine des drones, permettant d'entrevoir des configurations de véhicule susceptibles de répondre à une demande sociétale nouvelle pour un moyen de transport souple, sûr, disponible, complémentaire voire alternatif des moyens sols, et pouvant à ce titre constituer, selon ses promoteurs, une réponse à l'engorgement des réseaux routiers et ferrés des grandes mégapoles, mais aussi une réponse à des besoins plus spécifiques comme des transports médicaux ou VIP.

On attend de ces solutions de transport une grande souplesse d'emploi, une utilisation au sein des lieux d'habitation imposant des caractéristiques de décollage et d'atterrissage à minima courts, idéalement verticaux, une absence de compétences particulières de l'utilisateur

(à terme) et un impact environnemental réduit pour se conformer à la sensibilité grandissante des populations à la pollution (qu'elle soit de nature atmosphérique, acoustique, voire visuelle), qui plus est en zone urbaine.

Dans le domaine de l'aérien, le concept hérite, à de nombreux égards, d'une longue lignée de développements autour de la voiture volante ou du transport personnel (à vocation plus militaire dans certains cas), et profite des progrès fait en matière d'automatisation du vol ainsi que de l'émergence concomitante des drones (ou UAV pour *Unmanned Aerial Vehicles*). L'UAM pour *Urban Air Mobility* regroupe l'ensemble de ces utilisations d'aéronefs pilotés ou non, qui peuvent être habités (transport de passager), ou non (transport de biens, colis) dans un environnement urbain. L'UAM englobe donc un large spectre de véhicules, du petit drone pour le transport de petite charge au taxi-aérien, et ceci pour une grande variété de missions : sécurité, urgence médicale, logistique, transport.

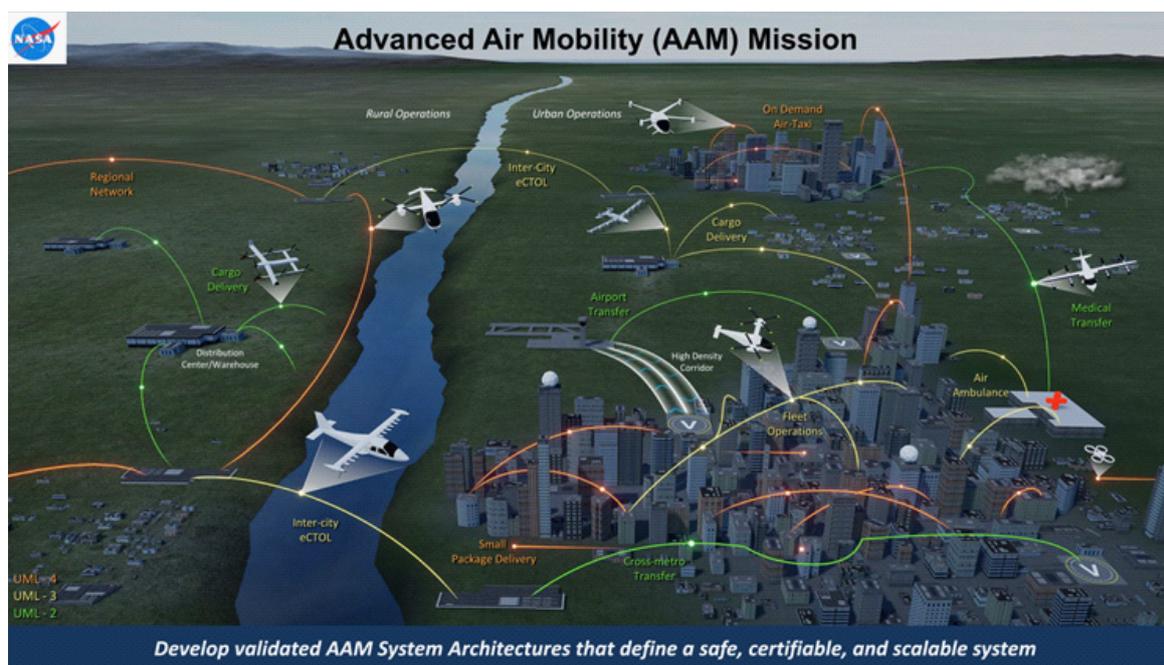


Figure 1. Vision de l'AAM selon la NASA (crédit NASA)

La NASA, acteur très impliqué sur ces différents sujets, a récemment proposé une généralisation de l'UAM dans le concept d'AAM (*Advanced Air Mobility*) qui couvre aussi bien les besoins urbains ou péri-urbains et les besoins de liaisons interurbaines, requérant des distances franchissables plus grandes, et recouvrant le marché préexistant des *Commuters*. Il embrasse, en outre, d'autres services de type cargo, par exemple, voire des activités de sécurité civile et de protection civile. La figure 1 illustre cette variété de contextes couverts par le concept d'AAM.

L'AAM est avant tout un Concept d'Opérations (CONOPS) qui associe un ensemble de véhicules rendant des services, à partir et vers des infrastructures d'accueil, et opérés au sein d'un espace aérien organisé imposant des règles de vol, des trajectoires, des compétences des opérateurs, des niveaux de fiabilité et de sûreté de fonctionnement pour assurer la sécurité au sens large des personnes et des biens. C'est la conjonction de ces composants, auxquels il faut naturellement ajouter les opérateurs, les clients et un certain nombre d'autres parties prenantes (constructeurs, ateliers de maintenance, organismes régulateurs, etc.), qui forment ensemble ce concept. On note indubitablement une forte ressemblance organisationnelle avec l'actuel Système de Transport Aérien, dont il hérite et avec lequel il se met en cohérence.

L'AAM couvre ainsi un grand nombre de missions, ou de services, qui vont du taxi aérien à des activités de travail aérien en passant par le transport régulier – navette – de passagers se rendant régulièrement d'une zone péri-urbaine, par exemple, au cœur de ville, mais également les missions non-habitées de l'UAM comme le transport de colis, le transport médical (par exemple poche de sang ou défibrillateur en cas d'urgence).

Le recensement de ces services s'appuie généralement sur une analyse des opérations actuellement menées par d'autres aéronefs, comme les hélicoptères, ce qui conduit à envisager des opérations de surveillance de lignes électriques ou d'ambulance.

Il s'appuie également sur l'analyse des besoins en déplacements de la population, besoins récurrents ou ponctuels, et sur la situation actuelle presque entièrement assurée, dans les pays développés, par des moyens terrestres (routier ou ferroviaire). Il anticipe également

des besoins de transport à la demande mal couverts à ce jour¹, de type inter urbain, c'est-à-dire reliant deux centres économiques de taille moyenne (métropoles régionales par exemple). Ce type de liaison, généralement assuré par des appareils nommés *Commuters*, reste un marché en devenir sauf dans des cas bien particuliers de desserte de zones isolées (îles) pour assurer la continuité territoriale.

LES CONCEPTS DE VÉHICULE

Ainsi, l'AAM ambitionne notamment d'être une alternative possible face à la saturation des réseaux routiers et les entreprises qui s'y intéressent établissent un argumentaire économique, en particulier sur ce type de services, qui sert ensuite de support aux choix, notamment technologiques, sur les véhicules susceptibles d'y répondre. Même si l'on peut douter de la probabilité d'un tel scénario de remplacement massif des trafics routiers par un transport aérien, il est en effet sous-jacent à nombre de développements actuels.

A ce titre un grand nombre des développements d'aéronefs se situent aux États-Unis (Terrafugia, Joby Aviation, NASA, UBER), mais aussi en Europe (City Airbus, Lilium Aviation, Volocopter, Ascendance Flight Technologies, etc.) et en Asie (Chine, Ehang). On dénombre actuellement près de 400 projets² plus ou moins aboutis de véhicules entrant dans cette grande famille de l'*Advanced Air Mobility*, soutenus pour certains par de grands groupes du secteur aéronautique, mais également automobile, et surtout par de nouveaux acteurs de type startup. Ces derniers voient dans ce changement de paradigme une occasion pour de nouveaux compétiteurs de s'y implanter à travers des solutions technologiques innovantes qu'ils espèrent développer et imposer rapidement grâce à leur agilité.

Le segment des appareils de petite capacité (jusqu'à 5 places y compris le pilote) est majoritaire pour des opérations principalement axées vers le taxi urbain ou péri-urbain. Ces véhicules visent un décollage vertical et s'appuient sur la propulsion électrique distribuée pour assurer à la fois les performances attendues, l'absence d'émissions polluantes en opération et un haut niveau de sécurité des vols. Ils en espèrent également une empreinte acoustique faible, même si ce point, essentiel,

1. Selon toutefois les grandes zones géographiques : le maillage en voies ferrées en Europe occidentale, par exemple, est nettement plus dense que dans d'autres régions du Globe.

2. Le site <https://evtol.news/> recense ces différents projets quelle que soit leur maturité

est loin d'être acquis.

Pour l'interurbain, où la performance en croisière devient primordiale, les configurations proposées s'apparentent plus aux appareils conventionnels (voilure fixe empennée), allant de l'électrification d'appareils existants jusqu'à des solutions plus originales, fondées sur une distribution de la propulsion afin de bénéficier d'effets multifonctionnels apportant des avantages opérationnels (soufflage voilure notamment pour réduire les distances de décollage et d'atterrissage).

Du point de vue réglementaire, l'EASA en Europe a lancé un vaste chantier de rédaction d'une future CS (*Certification Specifications*) ciblant les véhicules de type VTOL³. En cours d'élaboration, celle-ci détoure les futures attentes en matière de certification, sur le principe du dernier amendement de la CS-23 (document définissant les conditions de navigabilité pour les aéronefs légers de moins de 5,7 t, incluant la catégorie Commuter jusqu'à 8,6 t et 19 passagers), et fixe les niveaux requis de fiabilité d'ensemble selon le type de mission et la nature des zones survolées. Ainsi, ce document définit deux catégories de certification : basique (« basic ») et renforcée (« enhanced »). Cette deuxième certification est nécessaire pour des opérations au-dessus de zones fortement peuplées ou pour des opérations de transport commercial. En catégorie renforcée, les pannes catastrophiques (résultant en une issue fatale) doivent survenir avec une probabilité moindre qu'une sur un milliard par heure de vol. En catégorie basique, cela dépend du nombre de passagers ; par exemple avec 0 ou 1 passager, cette probabilité doit être inférieure à un sur un million par heure de vol.

QU'EN EST-IL EN FRANCE ?

Les acteurs français se lancent aussi dans l'UAM ou l'AAM dans la perspective des nouveaux débouchés que cela pourrait ouvrir. On peut citer parmi les grands groupes aéronautiques, les démonstrateurs coté Airbus, dont les équipes françaises contribuent, même si les démonstrateurs visibles sont réalisés par des équipes hors France : le CityAirbus par Airbus Helicopters, principalement porté du côté Allemand, et le Vahana par Airbus A3 en Californie dont l'équipe a maintenant été dissoute. Du côté véhicule, en dehors de la start-up Ascendance

Flight Technologies qui travaille sur un appareil de type eVTOL, c'est plutôt le commuter CTOL qui est visé avec des sociétés comme par exemple Voltaéro, Aura Aéro, Avions Mauboussin ou Blue Spirit Aero.

Du côté des équipementiers, Safran est très présent sur la propulsion, les motorisations électriques et les sources d'énergie hybride. De nombreuses PME et TPE se positionnent également sur des équipements type piles à combustible, moteurs électriques, électronique de puissance, etc.

Les opérateurs de transport s'intéressent aussi au sujet et on peut citer en France l'initiative d'ADP et de la RATP autour de l'aérodrome de Pontoise pour mettre en place un écosystème favorable à l'étude des infrastructures et des opérations de véhicules de type eVTOL.

Certaines métropoles, et des régions sont également actives dans ce paysage. Ainsi en est-il par exemple, dans la zone géographique du pôle de compétitivité Aerospace Valley :

- Toulouse Métropole, associé à différents partenaires, parmi lesquels Airbus, l'ONERA, et d'autres, a remporté le projet VILAGIL, sur l'appel à projets Territoires d'Innovation. Le projet vise la décarbonation du territoire, la mobilité intelligente, et singulièrement l'UAM.
- la région Nouvelle-Aquitaine porte également une ambition sur l'UAM, avec des acteurs de son territoire, et par exemple une étude de faisabilité en cours sur l'UAM.

Ces initiatives sont accompagnées par des travaux de R&T soutenus par la puissance publique, en particulier la DGAC, auxquels l'ONERA participe activement. Ils couvrent de nombreuses thématiques afin de répondre aux enjeux posés par l'ambition de faire voler des aéronefs dans un milieu urbain et péri-urbain pour des missions variées. Les régions sont également actives pour fédérer et soutenir les acteurs de leur territoire et leurs projets d'aviation légère décarbonée, comme l'initiative MAELE du pôle de compétitivité Aerospace Valley et ses appels à manifestation d'intérêt.

3. VTOL signifie Vertical Take Off and Landing. On ajoute souvent un « e » pour le caractère électrique de la propulsion, et la plupart des véhicules AAM sont soit des eVTOL soit des eCTOL (CTOL pour Conventional Take-off and Landing). On parle également de STOL (Short Take-off and Landing) et eSTOL

QUELLES RECHERCHES POUR QUELS VERROUS ?

Le déploiement d'un ou plusieurs services aériens en environnement urbain et péri-urbain opérés par de nouveaux véhicules, nouveaux dans leurs configurations, leurs modes de propulsion et bien d'autres aspects, impliquent de nombreuses difficultés scientifiques et techniques. La NASA a proposé l'organisation de la figure 2 qui résume bien l'ampleur des sujets à aborder : les problématiques au niveau des véhicules (en rouge), les problématiques au niveau de l'intégration dans l'espace aérien (en bleu) et les problématiques liées à des enjeux sociétaux (en violet).

LA PERFORMANCE POUR RÉALISER LA MISSION

Le premier enjeu est d'être en mesure de concevoir des aéronefs capables de réaliser les missions envisagées de façon sûre, efficace énergétiquement et économiquement soutenable. Les près de 400 véhicules proposés par les différents acteurs et mentionnés plus haut illustrent que l'espace d'exploration est important.

La configuration de l'aéronef est évidemment un point central avec par exemple le choix du nombre et de la position des rotors (pour la capacité VTOL), le nombre et

les positions des hélices (qui peuvent être les rotors de sustentation, et vice-versa) pour la propulsion ou encore l'utilisation d'une ou plusieurs ailes pour la sustentation en croisière.

L'aérodynamique du véhicule pour les différentes phases de vol devra être minutieusement étudiée, avec une problématique centrale autour des interactions entre hélices (ou rotor) et surfaces portantes. Cette aérodynamique est directement couplée aux qualités de vol de l'appareil et ce dans une enveloppe de vol particulière puisque couvrant des phases de vol vertical, d'avancement mais aussi de transition. Ainsi, le choix des surfaces de contrôle et la façon de piloter l'appareil, à travers des lois de pilotage faisant appel à des calculateurs actionnant ces surfaces en association avec les rotors et hélices, sont autant de points cruciaux.

Enfin, tout ceci devra prendre en compte le mode de propulsion et l'énergie utilisée (le vecteur électrique est central pour la distribution de la puissance de propulsion à bord, électricité en provenance de batteries, de piles à combustible, ou de solutions d'hybridation) qui aura un impact au premier ordre sur la configuration, la masse de l'appareil mais aussi son pilotage en association avec le management de l'énergie, et ses opérations.

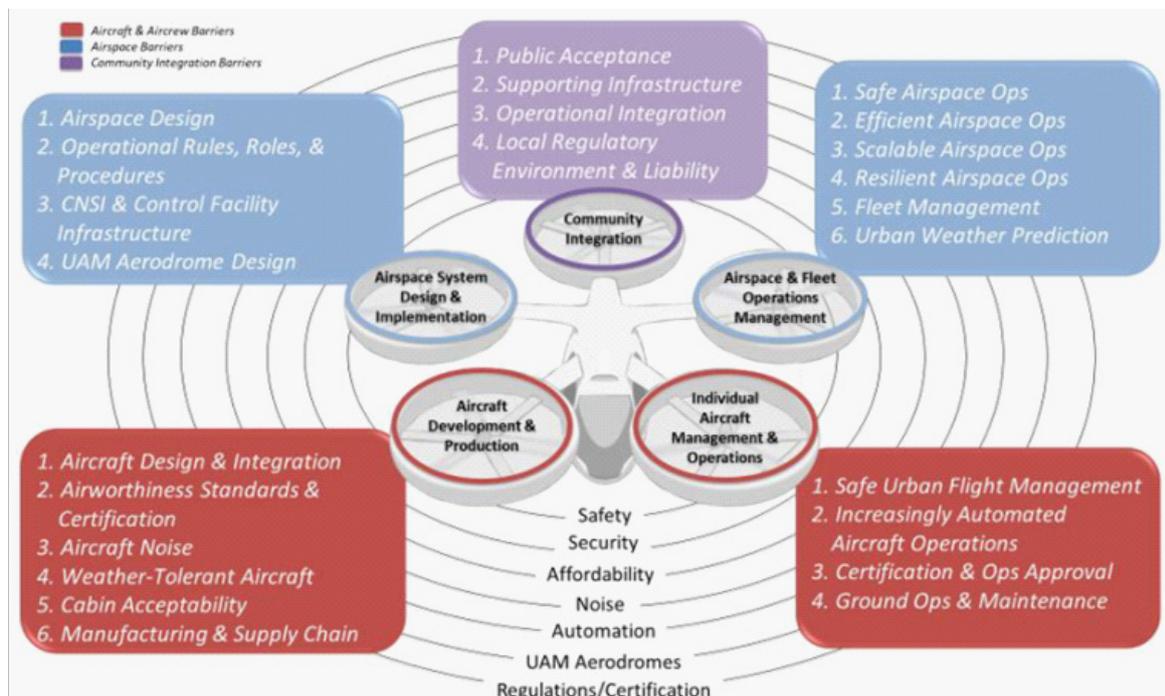


Figure 2. NASA UAM framework barriers

LA SÉCURITÉ ET LA SURETÉ

L'enjeu est ici de définir et prouver le bon niveau de sécurité garantissant que ces nouveaux services ne vont pas faire peser de risque inconsidéré pour les utilisateurs mais aussi pour les populations survolées. Le processus et les règles de certifications de ces nouveaux aéronefs sont en cours d'instruction par l'EASA et la FAA, comme évoqué précédemment, et couvrent de très nombreux aspects. On peut citer par exemple : la capacité à voler dans certaines conditions météorologiques (givre, foudre), les risques liés à la compatibilité électromagnétique entre les systèmes et la chaîne d'énergie ou encore la résistance au crash (survivabilité des équipages et des biens).

L'ambition d'opérer à terme des véhicules autonomes sans pilote pose aussi des questions de sécurité comme la protection vis-à-vis de malveillances (cybersécurité) mais aussi la capacité à éviter des obstacles ou de possibles collisions (voir et éviter) en adaptant la trajectoire de vol aux circonstances rencontrées : ce dernier point est d'autant plus primordial qu'il s'agit de décoller de zones urbaines et d'y atterrir, ces lieux étant par essence caractérisés par la présence d'obstacles de natures diverses (immeubles, antennes, poteaux et câbles etc.) et générateurs d'une aérologie locale perturbée et difficilement prévisible.

Cela nécessite la mise au point de différents capteurs et systèmes fiables et robustes pour le vol et la navigation autonome, et une compréhension fine de l'interaction entre un éventuel équipage à bord ou au sol, des opérateurs distants (par exemple contrôleurs aériens) et ces fonctions embarquées qui assurent à l'appareil une certaine autonomie de décision et d'action.

L'INTÉGRATION DANS LE TRAFIC AÉRIEN

Outre les aspects mentionnés ci-avant sur la faculté, pour l'aéronef, de « voir et éviter » les autres véhicules peuplant l'espace aérien et les obstacles, des concepts d'insertion de ces véhicules dans le trafic devront être définis de façon plus précise. Les routes qu'ils emprunteront, l'interaction avec l'aviation traditionnelle, la gestion des aléas compliquée par la difficulté à définir ou trouver des zones de posée d'urgence, le régime de suivi par les gestionnaires traditionnels de l'espace aérien, la mise en place concrète du « U-space », dédié aux opérations de drones à basse altitude, etc. Tous aspects qui méritent encore des développements pour assurer

une coexistence sûre entre ces nouveaux acteurs de l'espace aérien, et ceux qui y évoluent déjà.

L'ACCEPTABILITÉ ET L'IMPACT ENVIRONNEMENTAL

Le vol urbain exige une attention particulière à la perception qu'auront les utilisateurs et les populations confrontés à la cohabitation avec ces services. L'enjeu est ici d'assurer un impact visuel et auditif le plus faible possible. Les émissions sonores sont un des principaux verrous de l'acceptabilité et sont déjà aujourd'hui un facteur limitant pour les opérations des hélicoptères. Les aéronefs devront être les plus silencieux possibles mais il s'agira également de comprendre la propagation du bruit dans un environnement urbain complexe par nature et la perception de ces émissions sonores dans le bruit de fond urbain. Enfin, le déploiement de service de type taxi-urbain devra assurer aux voyageurs un niveau de confort en terme de bruit interne et de vibrations.

L'acceptabilité de ces nouveaux services sera aussi confrontée aux légitimes exigences sociétales sur la consommation d'énergie, les émissions de gaz à effet de serre et la pollution locale. Au-delà de cet impact en opération, il s'agit également de se conformer aux exigences de développement durable en se préoccupant de ces aspects tout au long du cycle de vie du véhicule et de ses besoins récurrents, notamment en énergie. Ces aspects rejaillissent directement sur les choix technologiques opérés, tant sur les sources d'énergie, avec par exemple le recyclage des batteries, la production d'électricité pour les charger ou d'hydrogène pour l'alimentation de piles à combustible, que sur les matériaux employés pour la structure des appareils (majoritairement de type matériaux composites).

LES INFRASTRUCTURES

Les infrastructures sol représentent aussi un enjeu fort pour ces concepts. Souvent nommés « vertiports », les infrastructures qui accueilleront véhicules et passagers devront concilier des objectifs de sûreté (contre de possibles actions malveillantes), de sécurité (avec une excellente fiabilité des systèmes concernés), et encore d'efficacité (par exemple pour permettre un chargement rapide des passagers et en se situant à des nœuds d'échange avec d'autres moyens de transport ou de déplacement, dans une perspective d'intermodalité fluide). La problématique de la logistique associée aux rechargements et/ou aux changements de batteries est également essentielle.

AÉRONAUTIQUE

MOBILITÉ À LA DEMANDE, MOBILITÉ URBAINE AÉRIENNE, ET MOBILITÉ AÉRIENNE AVANCÉE

Bien qu'ils ne s'agissent pas de « vertiports », la France dispose d'un maillage unique en aérodromes⁴ de tailles variées, généralement à proximité d'agglomérations. Cette situation s'avère être un atout considérable dans la perspective de développement de l'AAM, principalement pour son volet connexion interurbaine, mais également comme base logistique et de maintenance pour les autres usages.

QUELLES ACTIVITÉS À L'ONERA ?

L'ONERA, de par ses missions, assure à la fois un rôle d'expert auprès des services de l'État et de développement des connaissances disciplinaires et métiers à même d'aider l'industrie à développer des technologies et produits innovants.

Le graphique de la figure 3 propose une vision d'ensemble des sujets techniques d'intérêt majeur portés par ces véhicules et sur lesquels l'ONERA s'investit.

L'intérêt porté sur ces différents sujets de recherche a conduit l'ONERA à inscrire dans la durée une feuille de route spécifique, pour assurer la cohérence d'ensemble de son implication et des investissements correspondants.

UN RÔLE D'EXPERTISE AUPRÈS DE LA DGAC

L'ONERA remplit cette mission d'expertise auprès de l'État dans le domaine des drones par un accompagnement vers la mise en place de solutions techniques pour les nouvelles opérations « risquées », qui permettront les avancées réglementaires. Ce schéma se retrouve sur les domaines évoqués ici, qui se recouvrent en partie, sans se confondre, avec le domaine des drones.

Ainsi de l'étude MOSQUITO (« MObilité et logiStiQue Urbaine - Pré étude vers une future règlementatiOn »), où l'ONERA, avec Airbus Helicopters (mandataire), Safran Electronics & Defense et Thales AVS, étudient quatre dimensions essentielles de l'UAM : la sécurité, la cybersécurité, les problématiques électromagnétiques, et l'acoustique. L'ONERA y est notamment très impliqué sur ces deux derniers sujets.

Dans la convention d'expertise et de recherche PHYDIAS (convention portant sur des « Drones Innovants pour de nouvelles Applications et une Sécurité accrue »), financée par la DGAC à l'ONERA, ce dernier étudie des aspects complémentaires des domaines mentionnés ci-dessus.

Dans cette optique, la DGAC a aussi demandé à l'ONERA de porter un groupe de travail sur la certification. Ce «GT

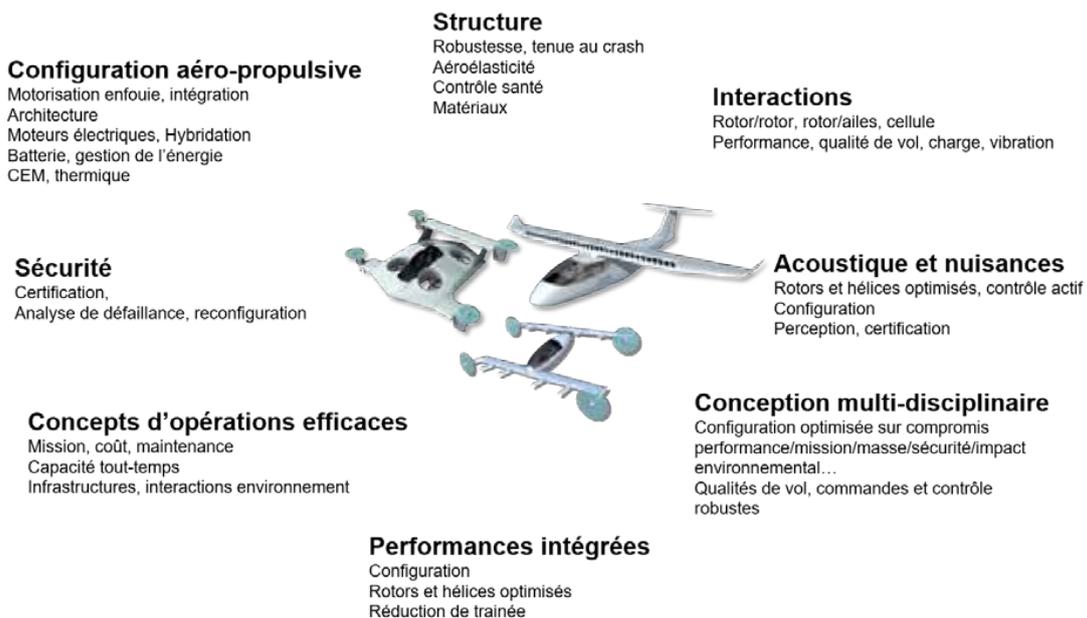


Figure 3. Autour des concepts issus du PRI Safran Tech et d'AMPERE, les thèmes de recherche abordés à l'ONERA

4. Plus de 500 en France

MOBILITÉ À LA DEMANDE, MOBILITÉ URBAINE AÉRIENNE, ET MOBILITÉ AÉRIENNE AVANCÉE

certification », qui rassemble un grand nombre d'acteurs français concernés par la certification des drones et des VTOLs pour l'UAM, a pour mission de coordonner la vision française sur le sujet, notamment sur les textes réglementaires qui sont constitués par l'EASA.

Par ailleurs l'ONERA travaille dans PHYCIEL, une autre convention DGAC, sur les « Contraintes d'Intégration Électriques » de ces aéronefs en se focalisant sur les phénomènes physiques essentiels qui conditionnent les règles d'intégration. L'approche multidisciplinaire retenue, numérique et expérimentale doit permettre d'en déduire à la fois des diagnostics originaux, mais encore des configurations optimales pour la sécurité.

UNE IMPLICATION EN RECHERCHE ET TECHNOLOGIE AUX CÔTÉS DE L'INDUSTRIE

Avec Airbus Helicopters (mandataire), l'ONERA travaille depuis fin 2020 sur un projet DGAC, MOTUS (« Minimisation de l'impact acoustique Opérationnel des VTOLS en conditions UrbaineS »), qui concerne l'acoustique des VTOLS (hélicoptères tout comme véhicules pour l'UAM). Ce projet vise à comprendre les mécanismes d'acceptabilité, améliorer les outils de prédiction, et maturer des technologies de réduction du bruit.

Un Projet de Recherche et d'Innovation (PRI) pluriannuel a été mis sur pied entre Safran et l'ONERA de façon à travailler en commun sur quelques sujets technologiques-clefs de ces configurations. L'objectif poursuivi est de mieux comprendre l'impact de certains choix, liés à la configuration des aéronefs ou aux technologies envisagées pour leur propulsion, sur le dimensionnement final, et d'en tirer des recommandations et des spécifications réalistes pour la conception des principaux équipements de propulsion. Deux volets ont été abordés, l'un relatif aux configurations eVTOL et l'autre aux configurations conventionnelle eCTOL, toutes deux cependant exploitant le principe de propulsion hybride électrique distribuée. L'ONERA a plus particulièrement apporté son expertise dans les domaines de l'aérodynamique, notamment pour la prédiction des effets d'interaction hélice-voilure, de l'acoustique, des structures pour le dimensionnement voilure, de la mécanique du vol (performances, qualité de vol et lois de contrôle), enfin de la conception d'ensemble (OAD⁵).

5. Overall Aircraft Design

Sur ce même sujet de la propulsion distribuée, l'ONERA accompagne Airbus dans son activité de conception aérodynamique de l'installation motrice et de définition des lois de pilotage, qu'il mène au sein du projet DGAC Ottawan portant sur le démonstrateur en vol ecoPulse (conçu sur une base de TBM900), projet rassemblant également Daher (leader), et SAFRAN.

L'ONERA participe également à l'initiative évoquée plus haut avec ADP autour de l'aérodrome de Pontoise. Cette initiative est encore en construction, mais devrait permettre de construire des solutions sur les principaux aspects essentiels de l'UAM (développement de véhicules, infrastructures, opérations, intégration dans l'espace aérien, et acceptabilité). L'ONERA pourra y contribuer sur ces différentes dimensions, et s'est proposé en particulier sur les problématiques acoustiques.

Enfin, l'ONERA accompagne, grâce à son expertise multidisciplinaire, un certain nombre de startups développant des propositions de véhicules répondant aux concepts d'opération de l'UAM, de façon à les aider à identifier et lever certains des points critiques dans les domaines technologiques et scientifiques cités précédemment.

DES INVESTISSEMENTS PROPRES

En partenariat avec CEA Tech, l'ONERA a mené en 2012-2013 quelques travaux de prospective relatifs à la propulsion électrique pour les aéronefs. Ils en ont détourné la faisabilité et le domaine d'intérêt, et ont identifié les thématiques de recherche à pousser pour aider à son émergence.

Parmi ces technologies, la propulsion distribuée tient une place centrale.

Sur cette base, l'ONERA a lancé un premier projet sous financement Carnot dédié à l'étude d'une solution de propulsion originale d'hyper-distribution de fans électriques, disposition dont on attend un gain substantiel en portance à basse vitesse par soufflage voilure (voir Figure 4). Nommé AMPERE (pour *Avion à Motorisation réPartie Electrique de Recherche Expérimentale*), ce projet à la fois numérique et expérimental s'est focalisé sur deux des challenges identifiés, d'une part l'intégration motrice et le bilan aéropulsif d'ensemble, d'autre part le contrôle de l'aéronef à travers la combinaison des

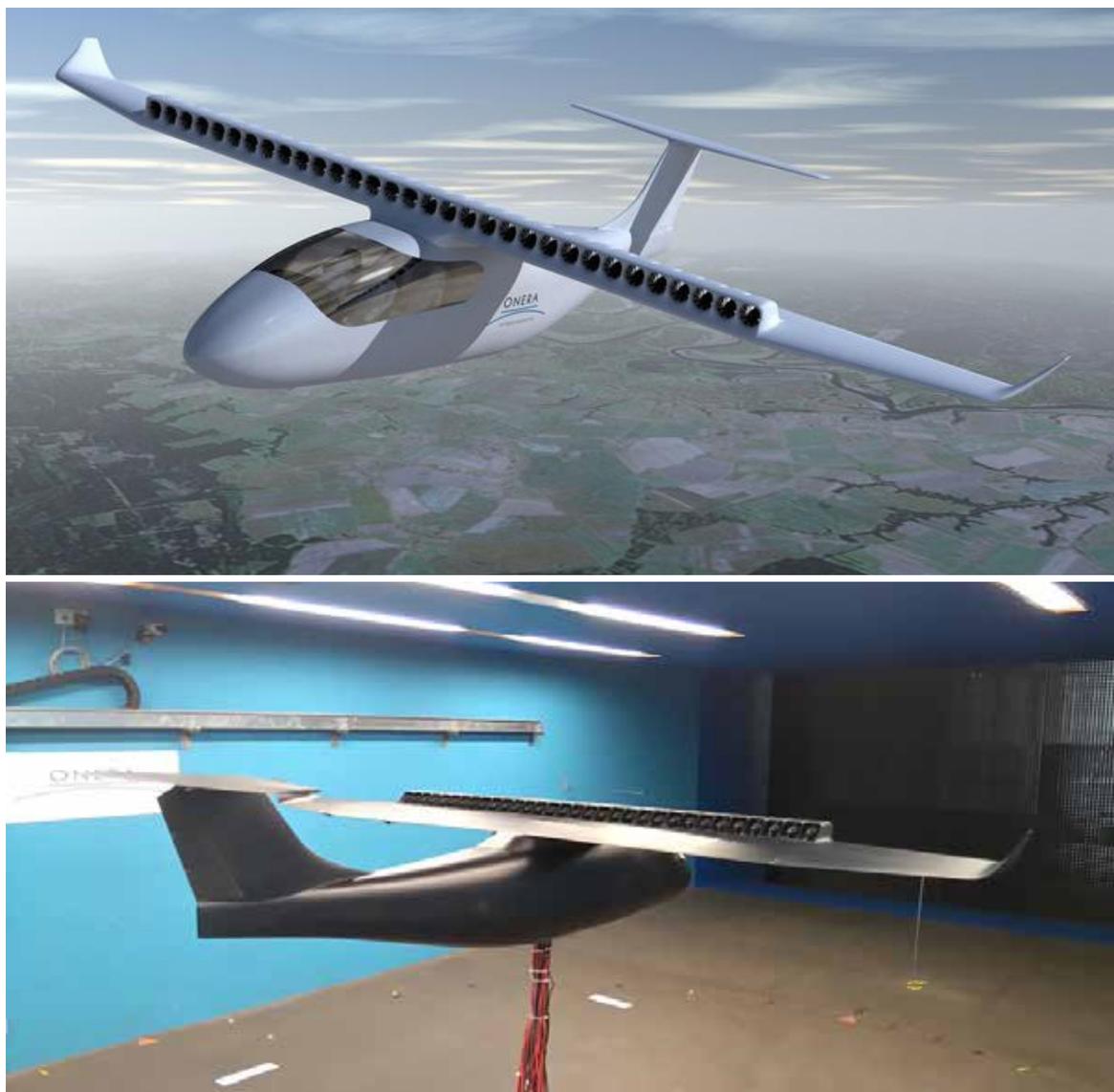


Figure 4. AMPERE et sa maquette (échelle 1/5 soit 2,90 m d'envergure) dans la soufflerie L2 (centre ONERA de Lille)

gouvernes conventionnelles et de la motorisation. Son bilan confirme l'effet majeur du soufflage tel qu'attendu avec un accroissement notable du domaine de vol contrôlé de l'appareil, notamment pour les basses vitesses. Il conduit aussi à l'identification de règles de dimensionnement, au niveau aéronaf, spécifiques à ce type d'installation motrice pour l'obtention d'un bon compromis entre basse vitesse et performances de croisière.

Un second Projet de Recherche, plus spécifiquement dédié à l'étude aérodynamique fine de l'intégration de fans sur voilure, a également été engagé (voir Figure 5). Nommé BLISARD (pour *Boundary Layer IngeStion and*

AeRodynamic Design), ce projet s'intéresse aux configurations aéro-propulsives réparties avec ingestion de couche limite (et donc potentiellement enterrées) en associant études numériques et essais aérodynamiques en soufflerie de recherche (dans la soufflerie L1 du centre ONERA de Lille, voir Figure 5). Le but de l'essai était de caractériser les coefficients aérodynamiques autour et au-delà du décrochage pour mieux en connaître le comportement. Il a ainsi été possible de quantifier les gains et pertes potentiels associés à une telle architecture aéro-propulsive et de mettre en évidence les phénomènes et paramètres clés nécessaires à l'intégration de ce type d'architecture sur un aéronaf.

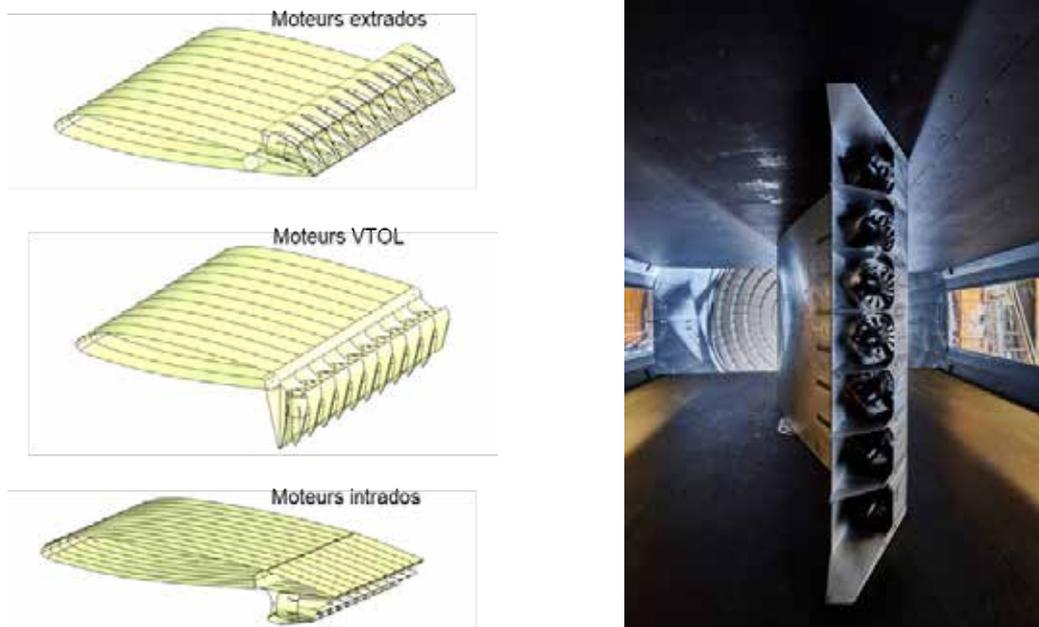


Figure 5. Maquette BLISARD, ses trois modes d'utilisation et son installation dans le soufflerie L1 du centre ONERA de Lille

Ce projet, comme AMPERE, contribue à la constitution d'une base de connaissances qui conduit à la proposition de configurations innovantes, comme DRAGON (pour Distributed fans Research Aircraft with electric Generators by ONERA), étudié par l'ONERA dans le cadre de CleanSky 2.

Au-delà de ces activités dédiées à l'UAM, nombre d'autres actions menées à l'ONERA, sur le sujet des hélicoptères, des drones, ou même d'autres domaines, contribuent au développement de connaissances nécessaires au déploiement de solutions pour l'UAM : acoustique sur les hélicoptères ; « voir et éviter » pour les drones ou d'autres aéronefs ; technologies et algorithmes pour l'autonomie des drones ; facteurs humains et interactions ; lidars dédiés aux mesures aérologiques, méthodologies de conception multidisciplinaire et multifidélités ; travaux menés sur l'U-space avant que le sujet UAM devienne prééminent, etc.

CONCLUSION

Le développement rapide d'un certain nombre de technologies a rendu envisageable le déploiement de ces nouveaux concepts de mobilité que sont l'ODM, l'UAM, ou encore l'AAM. Il en résulte un très grand dynamisme de ce secteur, qui voit régulièrement émerger de nouveaux projets de véhicules aériens et de nouveaux entrants. Pour atteindre la maturité nécessaire à leur exploitation, pour répondre aux attentes sociétales et au besoin de sécurité croissant de nos contemporains, des développements scientifiques et techniques supplémentaires sont nécessaires et il faudra du temps pour atteindre les niveaux de sécurité exigés et garantir la faible empreinte acoustique compatibles avec un déploiement de ces aéronefs. L'ONERA possède une expertise technique sur la plupart des domaines concernés, qui lui permet de remplir sa double mission d'innovation au profit de l'industrie et d'expertise auprès de l'État (ici, la DGAC). Il l'exerce pleinement au profit de ce nouveau concept d'opérations aériennes à travers de nombreuses activités dont la montée en puissance devrait se poursuivre dans les années à venir. ■

AÉRONAUTIQUE

MOBILITÉ AÉRIENNE INTERURBAINE ET AÉRODYNAMIQUE OPTIMISÉE

par Benjamin Deveaux, ingénieur aérodynamicien chez Avions Mauboussin

La marque mythique d'Avions Mauboussin a été relancée par David Gallezot qui a fondé l'entreprise en 2011. Celle-ci est implantée à Belfort depuis 2017 avec une équipe d'une dizaine de personnes. L'objectif est de permettre une mobilité aérienne interurbaine responsable. En d'autres termes, on souhaite relier directement le cœur des villes avec une solution de transport aérien rejetant peu de CO₂. Afin d'illustrer l'intérêt de cette mobilité interurbaine, considérons par exemple le trajet entre Paris la Défense et Canary Wharf à Londres. Le trajet par avion de ligne ou par Eurostar dure environ 3h30, porte à porte. Avec un avion pouvant décoller de l'héliport d'Issy-les-Moulineaux et atterrir à London City, le trajet porte à porte ne dure plus que 1h30. Puisque la piste d'Issy-les-Moulineaux ne fait que 300m de long, l'avion doit posséder la capacité de décoller et atterrir court (STOL en anglais). Ensuite, la réduction des émissions de CO₂ des Avions Mauboussin passe par le développement d'un système de propulsion hybride électrique – thermique innovant, projet baptisé *Zéphyr*. Le moteur thermique, dans un premier temps alimenté en carburant conventionnel, fonctionnera à terme avec de l'hydrogène. Enfin, la structure sera réalisée en composites naturels avec du bois et des fibres issues de filières responsables.

Le premier modèle d'Avions Mauboussin sera un avion léger biplace en tandem : *Alérion M1h*. Le second sera un avion multimoteur régional hybride de 6 places : *Alcyon M3c*. Le premier vol d'*Alérion* est prévu en 2023 et celui d'*Alcyon* en 2024. La conception d'*Alcyon* s'appuiera sur les briques technologiques développées pour *Alérion*.

Parmi ces briques technologiques, l'aérodynamique d'*Alérion* devra lui permettre de décoller et atterrir court tout en ayant un large rayon d'action. Cela demande donc d'avoir une aile générant un coefficient de portance élevé pendant les phases de décollage et atterrissage tout en ayant un coefficient de traînée minimal durant le vol de croisière. Pour atteindre ces objectifs, un travail d'optimisation du profil d'aile a été réalisé, ce qui est schématisé dans l'encadré. Le résultat est un profil à géométrie variable disposant d'un bec de bord d'attaque et d'un volet double fente. La philosophie de la conception d'*Alérion* étant « simplicité et efficacité », une attention particulière a été portée à la simplification de la géométrie du profil et de la cinématique des éléments mobiles.

Une campagne d'essai réalisée au Laboratoire Aérodynamique Eiffel a permis de caractériser expérimentalement ce profil optimisé. Ces essais ont également permis



Alcyon M3c. un avion multimoteur régional hybride de 6 places

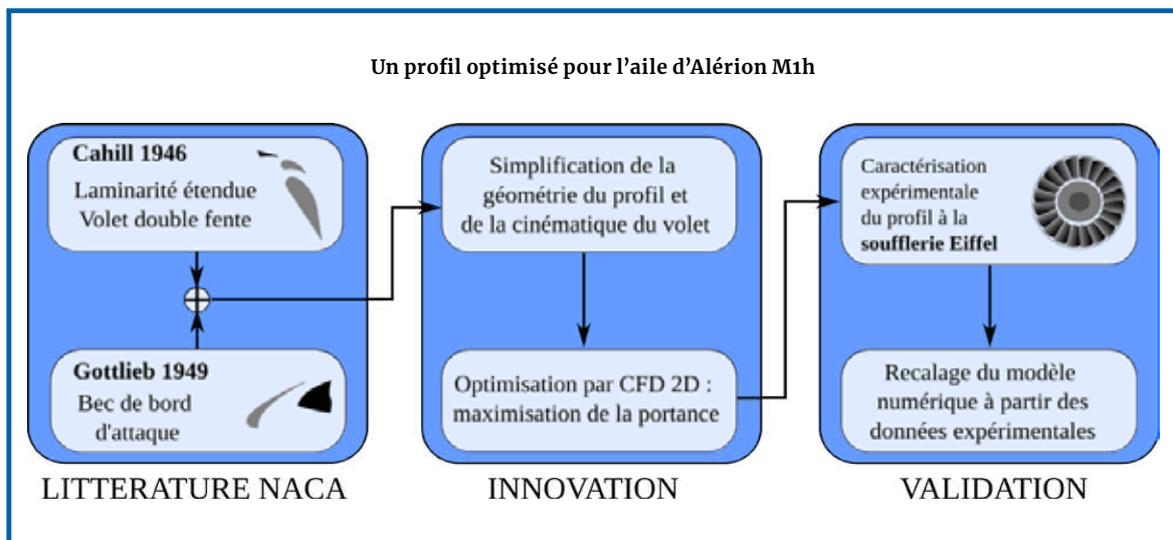


Alérion M1h, un avion léger biplace en tandem

d'évaluer la faisabilité de plusieurs solutions techniques. Des visualisations par fils de laine et des sondages dans le sillage ont été réalisés en complément des mesures d'efforts. Ces données expérimentales permettent d'une part d'analyser finement l'écoulement autour du profil, et servent d'autre part de référence pour valider les simulations numériques. La combinaison de l'approche expérimentale et numérique offre donc une caractérisation exhaustive de ce profil d'aile, posant ainsi des bases solides pour la suite du dimensionnement d'Alérion. ■



Profil d'aile d'Alérion M1h dans la soufflerie Eiffel



UN NOUVEAU CONCEPT : LE S-UAM OU PROCHE VÉHICULE URBAIN AÉRIEN

par Michel Aguilar, ingénieur honoraire de la DGA, membre de la commission technique Aviation légère

La VFS (*Vertical Flight Society*) américaine, qui recense entre bien d'autres fonctions tout ce qui décolle (et atterrit) verticalement, a donc recensé à ce jour (début 2021) (<https://evtol.news/aircraft>) sur toute la planète plus de 350 projets développés ou en développement. Quasiment tous ont cette particularité du décollage vertical grâce à la technologie des hélices (rotors) entraînées par des moteurs électriques. Le seul et unique « job » des moteurs électriques est de proposer de la puissance disponible sur un arbre en rotation. Mais ces kilowatts le doivent à l'énergie stockée dans une technologie en continuelle évolution : la batterie. Avantage majeur de cette technologie électrique : zéro rejet polluant en fonctionnement et discrétion assurée sur la pollution sonore. Inconvénient majeur de cette technologie : le recyclage des batteries, l'évaluation de son impact réel depuis le « 0 » jusqu'au « 1+ » de sa fabrication (le « + » pour son recyclage), mais aussi sa densité énergétique. Certes sur ce dernier point ses capacités énergétiques sont en constante progression, mais très loin derrière celles contenues dans 1 kg de kérosène. En tenant compte des rendements très faibles des moteurs thermiques, de l'ultra haut rendement des moteurs électriques, et des réserves énergétiques des batteries (ne jamais les vider complètement !) le gap est tout de même encore à l'avantage indéniable du carburateur, et dans un rapport de 1 à 16 ! Enfin, aux hautes altitudes (faible température), les batteries voient leur rendement chuter vertigineusement.



Mais au regard de l'étonnante capacité inventive (résilience) du monde de l'aéronautique, sa R&D a proposé très avantageusement de coupler ce moteur

électrique à un moteur thermique (turbomoteur ou autres) totalement optimisé pour justement... recharger en temps réel et essentiellement en croisière, les dites batteries. La propulsion étant alors assurée par ces moteurs thermiques pour une vitesse et une autonomie acceptables, mais dont le rendement malgré ses énormes progrès reste très faible, d'où une consommation contraire au sens de l'Histoire.

Ce concept hybride demeure tout de même très séduisant attendu que les moteurs électriques sont uniquement activés lors des décollages/atterrissages de sorte à rester quasi « invisibles » pour les oreilles très (trop ?) sensibles des riverains. Des essais via l'e-Fan (pionnier dans l'électrique avec son cahier des charges), et le Voltaéro (abouti dans l'hybride) en sont de dignes représentants. Le tout électrique restant très viable pour la formation des pilotes dont les tours de piste incessants seront acceptés par les riverains.

Et les projets ne manquent pas comme peut en témoigner ce simple panorama extrait de certains projets actuels développés ou en cours. Et point important : un « couplage » s'est établi entre les constructeurs de véhicules roulants (voiture) et les véhicules volants :

QUELQUES REMARQUES AVANT D'ABORDER LE NOUVEAU CONCEPT DU S-UAM

Si voler, se soustraire aux forces de la gravité, semble inscrit au plus profond du génome de l'Homme, force est de constater que tout commence par un rêve mais plus, peut-être, pour relever le défi lancé par les oiseaux et autres volatiles qui nous attirent vers le haut. À l'évidence la présente décennie 20-30 devrait témoigner de ce rêve à la portée de tous, mais en arrangeant la Matière au point de la rendre « plus légère que l'Air » ! Et qui n'a jamais éprouvé ce sentiment très fugace du moment unique où, aux commandes d'un petit avion, les roues quittent la piste, ne peut comprendre que désormais l'Homme ainsi fait n'aura de cesse de renouveler cette impression comme un « paradis perdu » ! Il n'est que de rappeler cette analyse du grand Leonardo da Vinci : « Une fois que vous aurez goûté au vol, vous marcherez à jamais les yeux tournés vers le ciel, car c'est là que vous êtes allés, et c'est là que toujours vous désirerez ardemment retourner »

UN NOUVEAU CONCEPT : LE S-UAM OU PROCHE VÉHICULE URBAIN AÉRIEN



APRÈS LE RÊVE, LA RÉALITÉ : QU'EN EST-IL EN CE DÉBUT DE 21^{ÈME} SIÈCLE ?

Nous le disions en début de rencontre, plus de 350 projets développés ou en développement sont dénombrés sur tous les continents, mais quasiment TOUS sont dotés d'hélices ou de rotors, et donc entraînés par des moteurs électriques avec les avantages et les inconvénients évoqués ci-dessus. Imaginons dans un premier temps (et les temps sont proches pour y parvenir) que des milliers d'aéronefs pour « monsieur/madame-tout-le-monde » sillonnent les villes – on parle alors d'UAM pour *Urban Air Mobility* – quid alors de la sécurité qui, même avec le développement de l'IA (intelligence artificielle) – aura besoin de beaucoup de temps pour rassurer le Citizen. Sans parler de ce bourdonnement incessant qui enveloppera la cité.

Le concept du s-UAM pourrait-il apporter une solution pérenne ?

QUID DU S-UAM ?

Le « s » de s-UAM est en réalité l'initial de « short », c'est-à-dire court, proche, à proximité. Ainsi, l'aire de décollage/atterrissage de cet aéronef de type VTOL (Vertical Take Off and Landing) sera positionnée à l'orée de la cité, c'est-à-dire à moins de 30 km du centre. Cette aire sera aménagée de sorte à se rendre quasi invisible aux oreilles sensibles des riverains locaux. De plus,

chaque aire sera espacée en moyenne de 100 km pour doter les villes petites, grandes ou moyennes de ce type de mobilité.

Des stations sol seront réparties sur tout le territoire dont le chef de station sera aussi pilote de drone. Ainsi, chaque aéronef sera tracté en permanence sur les écrans radars et/ou via le GPS comme déjà il apparaît sur les stations civiles et militaires. Toutes les caractéristiques du vol y seront affichées (vitesse, altitude, niveau de carburant, trajectoire en 3D, nombre de passagers, etc.), et sur une représentation holographique.



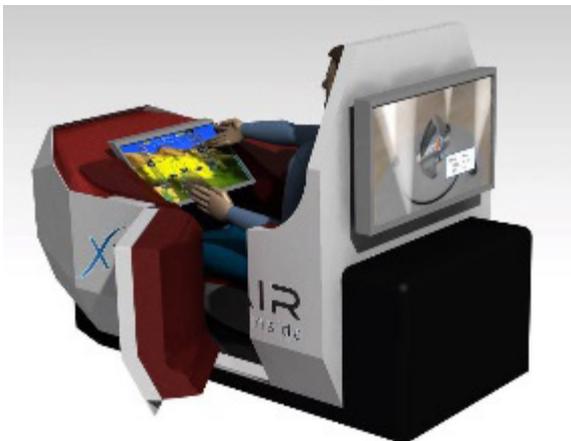
Point très important : la coopération entre le roulant et le volant s'intensifie essentiellement pour des raisons de maîtrise réciproque. En effet, pendant que les constructeurs de véhicules roulants (voitures, et sous peu, les camions) sont proches de maîtriser la technologie du pilotage automatique (aidé en cela par les développements « supersoniques » de l'intelligence artificielle !),

AÉRONAUTIQUE

UN NOUVEAU CONCEPT : LE S-UAM OU PROCHE VÉHICULE URBAIN AÉRIEN

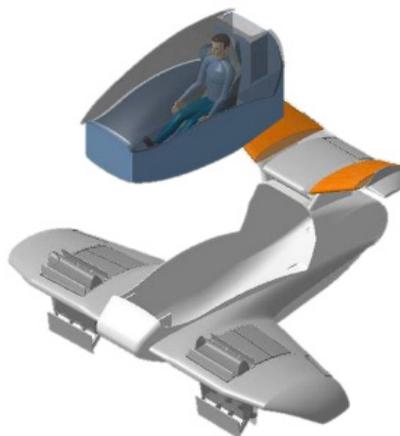
les constructeurs de véhicules volants sont, quant à eux, en passe de réussir le pari des aéro taxis et des vertiports (aires de décollage/atterrissage vertical).

Reste à persuader les futurs passagers de prendre place dans un « robot volant », ce qui n'est pas immédiat. Mais les études d'acceptation de ce type de mobilité aérienne lancées par les géants de l'aéronautique (Airbus, Boeing, etc.) indiquent bien que si quelques poches de résistance essentiellement psychologique persistent (la confiance est désormais totale sur le plan technologique), une convergence semble tout de même se profiler.



Ainsi, fort de toutes ces indications, le s-UAM proposera en premier lieu une formation type « permis-d'être-conduit » de cette nouvelle mobilité en effectuant quelques heures dans un simulateur afin de s'y familiariser. Un instructeur s'emploiera à répondre à toutes les questions, et notamment sur la sécurité en cas de panne irréversible. Sans en augmenter l'impact anxigène, il sera précisé que dans ce cas extrême le chef de station sol reprendrait « la main » pour devenir à son tour le pilote de cet aéronef, non visible à bord mais acteur très compétant au sol et en contact radio permanent avec le « commandant de bord » nommé ainsi dès que ce dernier prendra place dans ce nouveau mode de déplacement, et ce afin d'identifier un point d'impact sécurisé.

Un parachute sera alors libéré réduisant très fortement la vitesse de chute de l'aéronef, et à 300 mètres sol environ, la capsule passagers sous parachute se détachera du porteur de telle sorte que sa vitesse de chute se réduise d'autant, et à environs 100 mètres sol, un air bag sera déployé amortissant totalement l'impact terrestre.



Le s-UAM pourrait très bien caractériser la rencontre du « 2 » et du « 3 » en dimension, s'entend... En effet, la voiture électrique composée de la capsule passagers et du chariot électrique se présente alors comme un taxi commandé depuis son téléphone portable, et dont l'autonomie ne dépassera pas les 100 km à une vitesse maximum de 60 km/h. Destination : aire de décollage. Parvenu sur cette aire : plongée dans le sous-sol afin d'échanger le chariot pour des ailes qui viennent se clipser sur la capsule. Le décollage est alors programmé conformément à la commande initiale.

Parvenu à destination le processus s'inverse : atterrissage sur l'aire sise toujours en bordure de cité, échange des ailes pour un chariot électrique avec possibilité (mais dès la réservation) de conduire cette désormais voiture électrique, si et seulement si en possession du permis de conduire, jusqu'à la borne de rechargement située au plus près du lieu de rendez-vous en Cité.

Et la propulsion ? Le s-UAM est rendu possible grâce à son propulseur de rupture technologique : le thermoréacteur, dont le POC (Proof of concept) a été démontré expérimentalement en 2014 au sein d'un consortium composé de Safran Helicopter Engines, de Comat Aerospace et du laboratoire Pprime de Poitiers dans le cadre du programme RAPID de la DGA. La France (2016), les États-Unis (2018) et le Japon (2017) ont déjà délivré le brevet thermoréacteur.

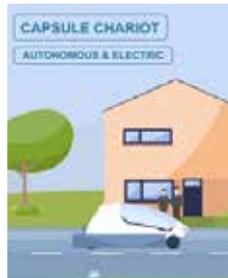
UN NOUVEAU CONCEPT : LE S-UAM OU PROCHE VÉHICULE URBAIN AÉRIEN

Le prochain article reprendra les caractéristiques essentielles de ce propulseur : combustion à volume constant (CVC), encombrement réduit, introduction d'une faible proportion d'hydrogène, réducteur acoustique,

gain en consommation à 2 chiffres, dispositif multiplicateur de poussée, aerospike, allumage thermique pour ne décrire que les points essentiels.



Réservation



Taxi-autonome



Aire de décollage



Préparation de la mission



Décollage

Altitude : 3000m maxi
 Vitesse de croisière : 200 km/h
 Distance franchissable : 800 km maxi



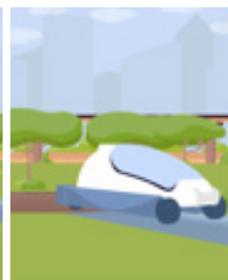
Arrivée à destination



Adaptation du chariot électrique



Taxi autonome ou...



Voiture électrique



« On time... »



Sur demande, possibilité de recevoir l'adresse de téléchargement (48 Mo) de cette animation. ■

L'ENJEU DE LA SECURITÉ ET DE LA PRÉSERVATION DE VIE DANS LE DÉPLOIEMENT DE LA MOBILITÉ AÉRIENNE INTERURBAINE

par **Arnaud Violland**, Co-fondateur et Président Directeur Général de SAFETYIN SAS



Figure 1. Description du concept « Fly SkyNest » très automatisé et très sécurisé sur base d'un aéronef à voilure fixe, doté d'un parachute balistique de secours, activé manuellement par le Safety Pilot ou automatiquement par un Centre Névralgique de Sécurité des Vols « UAM-SAFETYIN'Box »

Vidéo 1. Vidéo de 2 mins présentant la vision « Fly SkyNest » <https://youtu.be/9YNLuFoF8s4>

1 – [2020-2030] : L'AVÈNEMENT D'UNE NOUVELLE MOBILITÉ AÉRIENNE DE BASSE ALTITUDE

Le Projet «Fly Skynest©» (Figure 1), lancé en 2014 à la croisée d'inspirations française, suisse, américaine et émirienne tire ses origines de diverses sources, qu'il s'agisse de maturations et de convergences technologiques ou de travaux de recherche française et européenne, comme ceux de Claude Le Tallec et de son équipe de l'ONERA, ie les Projet IFATS (Innovative Future Air Transport System), ETAPS (European Personal Air Transport System) et PPlane (Personal Plane) dans la décennie [2000-2010]. Ce projet initialement développé par la Société de Conseil en Innovation Aéronautique, GlobAer Partners SAS, a mobilisé à ses origines en 2014 une dizaine d'experts aéronautiques, majoritairement français, dans des domaines très divers comme l'idéation, la R&D, la certification, l'analyse et la gestion des risques, la sûreté de fonctionnement, entre autres domaines...

Dans sa partie initiale d'étude de faisabilité dans le cadre d'un déploiement opérationnel à l'occasion de l'Exposition Universelle Dubai 2020, les sociétés Dassault Systems, Aurora Flight Sciences (entre temps acquise par Boeing), Mubadala, BRS, Autoflug, Oliver Wyman, AKKA Technologies, Risk&Co, SITA et l'ONERA – remerciements appuyés pour leurs soutiens à Messieurs Bruno Sainjon et Florin Paun - ont été impliquées dans les phases projet amont, Dans une 2nde phase initiée en 2016 avec la création de la startup SAFETYIN SAS, d'autres partenaires ont soutenu la dimension « Préservation de Vie » (#PreservingLives) à destination des aéronefs certes, mais surtout des opérateurs, qu'il s'agisse de safety pilots, safety télépilotes, quel que soit le nom donné à ces pilotes de taxis aériens dont les compétences techniques et qualités cognitives et mentales vont nécessiter un changement de paradigme substantiel. Le CERN, Airbus - via son accélérateur Airbus BizLab -, la Fédération Française Aéronautique – via

L'ENJEU DE LA SECURITÉ ET DE LA PRÉSERVATION DE VIE DANS LE DÉPLOIEMENT DE LA MOBILITÉ AÉRIENNE INTERURBAINE

son FFA FabLab -, la Fondation Solar Impulse – via ses #1000solutions – et l'Aéroclub de France, à travers notre marraine Catherine Maunoury ont successivement apporté soutien et expertises diverses dans l'objectif de comprendre, caractériser, objectiver et définir les solutions d'amélioration de la sécurité en vol et la sûreté de l'aviation générale existante.

2 – UNE NÉCESSAIRE REFORGE DE L'APPROCHE SÉCURITÉ DANS LA TRANSITION « AVIATION GÉNÉRALE DE LA FIN DU 20^e SIÈCLE » VERS LA « MOBILITÉ AÉRIENNE INTERURBAINE DU 21^e SIÈCLE »

Depuis ses origines, l'objectif du concept « Fly SkyNest© » s'est focalisé sur les bases fondamentales d'un déploiement concret et opérationnel de cette mobilité aérienne interurbaine, en s'inspirant notamment des progrès drastiques observés dans le secteur automobile sur ces dernières décennies. En effet, bien que peu de statistiques aient été compilées pour comparer les taux de mortalité entre l'automobile et l'aviation générale de basse altitude, la société de conseil Globaer Partners a réalisé une telle étude comparative, sur la base des statistiques gouvernementales, et notamment de la sécurité routière et de la DGAC. Il ressort de cette étude que l'automobile, qui a pu bénéficier d'améliorations drastiques de solutions et de technologies de sécurité ces dernières décennies, a connu une réduction d'un facteur 3 (3X) de cette mortalité entre les années 1970s et 2010s alors que le nombre de kilomètres parcourus sur la même période été multipliée par deux (2X), induisant de facto une amélioration d'un facteur six sur la période. Pendant cette même période, les taux de mortalité en aviation générale ont certes diminué, mais dans des proportions largement inférieures pour un nombre de kilomètres parcourus sensiblement stable.

Il en ressort comparativement, sur la base de mêmes distances parcourues sur terre ou dans les airs, les deux conclusions directionnelles suivantes :

- 1. Les crashes en Aviation Générale causent aujourd'hui quelques dix fois (10X) fois plus de mortalités que dans les accidents de voiture**
- 2. Sur ces 40 dernières années, le secteur automobile a réduit les mortalités quelques deux fois (2X) plus rapidement que l'Aviation générale**

Certes, lorsqu'il s'agit de comparer les statistiques de telles mobilités, il convient de prendre naturellement toutes les précautions d'usage concernant notamment des natures de mobilités bien différentes, entre une voiture utilisée nominale presque tous les jours et l'avion léger de loisir utilisé bien plus sporadiquement quelques WEs par an, dans des usage et contexte bien différents.

Mais au-delà de ces limitations, cette étude comparative a néanmoins eu la vertu de poser les bases d'un 1^{er} référentiel de comparaison « grosse maille », afin qu'il puisse incrémentalement être amélioré, induisant de facto un effort collectif d'amélioration comparable à ce qui a été permis dans de nombreuses industries par l'acculturation et le déploiement systématique et systémique de méthodes et d'outils type « Lean » et « 6 Sigma ».

Dans cette dernière décennie [2010 – 2020] où les consciences collectives ont été particulièrement préparées à l'émergence d'une telle aviation, en donnant la possibilité d'imaginer via des applications type « Uber » de se déplacer d'un point A à un point B en choisissant une voiture, ou un hélicoptère ou bien même un taxi aérien, de tels écarts de statistiques de sécurité entre le transport terrestre et le vol de basse altitude est tout simplement intenable et requiert un changement complet du paradigme « sûreté » dans une aviation générale en pleine mutation vers cette mobilité aérienne interurbaine que nous appelons tous de nos vœux.

Si l'automobile a bénéficié de progrès technologiques majeurs, comme l'Airbag, comme l'ABS, voire comme des modifications d'infrastructures comme le remplacement de carrefours « coupe-gorges » en ronds-points, d'autres progrès majeurs ont pu être accomplis grâce à l'électronique embarquée, permettant une compréhension beaucoup plus fine de la taxonomie accidentologique et incidentologique.

La nature même du marché de l'aviation générale, avec une base installée d'aéronefs se renouvelant à une fréquence bien moindre que celle du parc automobile, et les moyens financiers de cette industrie substantiellement plus limités que le secteur automobile, n'ont pas permis l'émergence de technologies et de techniques disruptivement

AÉRONAUTIQUE

L'ENJEU DE LA SECURITÉ ET DE LA PRÉSERVATION DE VIE DANS LE DÉPLOIEMENT DE LA MOBILITÉ AÉRIENNE INTERURBAINE

impactantes et permettant une compréhension fine de la taxonomie incidentologique. Le moindre degré d'électronisation des cockpits - relativement aux habitacles et systèmes automobiles - ainsi que l'absence d'enregistreurs de vol (types boîtes noires) dans ces aéronefs légers a jusqu'à ce jour entraîné un écart croissant entre les secteurs de l'automobile et de l'aviation générale induisant une moindre compréhension de la taxonomie incidentologique dans cette dernière.

C'est la raison pour laquelle la société SAFETYIN a travaillé ces 4 dernières années au développement de la SAFETYIN'Box© (Figure 3), un dispositif portable positionné sur la casquette de tous types d'aéronefs légers, permettant l'enregistrement des paramètres de vol et de paramètres liés aux pilotes - voire même des passagers - dans l'objectif de mieux comprendre les écueils de vol (typiquement le nombre et la taille des trous dans le fameux « Swiss Cheese » modèle de James Reason) et d'en dériver une cartographie statistique pour le développement de solutions types « détrompeurs » permettant de pallier les causes majeures d'accidents et in fine de réduire progressivement les occurrences de crashes mortels.

C'est dans cette logique que SAFETYIN a notamment déposé en 2016 un premier brevet consistant en une sur-poignée hybride, positionnée sur une poignée d'activation d'un parachute balistique d'avions (Type BRS, GRS...), et relié à une version de la SAFETYIN'Box configurée en mode « sécurité active » et permettant un déclenchement automatique de ce même parachute dans le cas d'incapacitation totale et avérée de la part du pilote. Cette chaîne de sûreté de fonctionnement, qui vient s'ajouter à une technologie « activée manuellement » ayant déjà fait ses preuves dans de nombreuses occurrences de « quasi-crashes », permettrait de sauver davantage de vies, dans des configurations plus automatisées que seront celles des taxis aériens déployés opérationnellement dans le transport de passagers entre un point A et un point B. Sur cette 1^{ère} brique est ensuite venue s'agréger une approche innovante « SAFETYIN-UAM© » (Figure 4) à destination de la nouvelle mobilité aérienne interurbaine (UAM) émergente pour une sécurité et une sûreté augmentées, approche en 4 paliers graduels de sécurité aérienne dans l'objectif ultime de la préservation de vie de l'intégralité de l'Équipage, un enjeu fondamental dans le succès du déploiement de telles solutions dans le Monde. Car comment imaginer



Figure 2. L'approche « Fly SkyNest » proposée en préparation de l'Expo Dubai 2020 intègre dès sa genèse un prisme holistique orienté déploiement concret de transports de passagers, avec un fort enjeu de préservation de vie pour l'ensemble de l'équipage dans quelle que configuration de risque qui puisse être.

**L'ENJEU DE LA SECURITÉ ET DE LA PRÉSERVATION DE VIE
DANS LE DÉPLOIEMENT DE LA MOBILITÉ AÉRIENNE INTERURBAINE**

que les niveaux de fiabilité et de sécurité demandés par les utilisateurs finaux – les passagers – soient différents des très hauts niveaux actuels de l'automobile voire de l'aviation commerciale ?

3 – LE FANTASTIQUE ENJEU D'UN DÉPLOIEMENT OPÉRATIONNEL POUR LES JOS DE PARIS 2024

Cette culture d'innovation (5 brevets déposés depuis 2015) et de « what-if », ancrée dans l'anticipation et la préemption de tous risques majeurs, aussi rares voire contre-intuitifs puissent-ils être, fait intégralement partie de l'ADN de SAFETYIN et

avait déjà permis d'apporter un 1^{er} niveau de sensibilisation aux autorités organisatrices de l'Expo Dubai 2020 (RTA, DCCA, Ministère Intérieur...). Considérant les spécificités, et les très grands enjeux de vitrine technologique, des JOs de Paris 2024, cette expérience et cette approche devraient s'avérer très précieuses dans le déploiement efficient de démonstrateurs de cette nouvelle mobilité interurbaine si stratégique pour la France sur son territoire et dans le rayonnement mondial de son excellence aéronautique, aux côtés d'autres acteurs de cette révolution issus de la Recherche et de l'Industrie française et européenne. A cœurs vaillants, rien d'impossible ! ■



Figure 3. La SAFETYINBox, 1^{er} développement de la société SAFETYIN. Dispositif multifonction spécialement conçu pour assister tous pilotes dans l'anticipation et la conscientisation des risques en vol. Module d'IA en cours de développement dans une 2^e version orientée « Sécurité Active » de la SAFETYINBox.



Figure 4 : l'approche « SAFETYIN-UAM© » préconisée en 4 niveaux graduels de sécurité aérienne dans l'objectif ultime de la préservation de vie de l'intégralité de l'Équipage.



Sea bubble à Saint-Tropez (crédit Francis Demange)

LES BATEAUX QUI VOLENT

Philippe Perrier, Commission technique Aérodynamique

Il y a plus d'un siècle que des ingénieurs ont eu l'idée d'appliquer les principes de l'aviation naissante aux bateaux en faisant supporter leur poids non plus par la poussée d'Archimède mais par des ailes marines. Un des plus fameux engins est celui de l'ingénieur italien Forlanini qui atteint 38 kt (soit environ 70 km/h ; 1 kt= 1,852 km/h) en « volant » sur le lac Majeur en 1905. Ces ailes marines sont désormais connues sous le nom anglais de *foil*.

Depuis ces débuts de nombreux bateaux à foils, aussi appelés hydroptères, ont sillonné les plans d'eau tout autour du globe. Hydroptères à moteur dans un premier temps pour des applications militaires ou de transport de passagers puis à voile pour battre les records de vitesse. On trouvera un historique assez complet des hydroptères sur Wikipédia.



Le premier bateau à foils de Forlanini

L'intérêt des foils pour des bateaux à grande vitesse est assez facile à comprendre. La poussée d'Archimède permet

SCIENCES ET TECHNIQUES AÉROSPATIALES

LES BATEAUX QUI VOLENT

d'équilibrer le poids d'un bateau sans aucune dépense d'énergie. Une très faible poussée horizontale suffit donc à déplacer un bateau « archimédien ». Mais lorsque l'on veut augmenter la vitesse, la résistance à l'avancement, appelée traînée pour les aéronefs, se manifeste principalement sous deux formes. La première est celle qui est due au frottement de l'eau à la surface de la carène, de façon tout à fait analogue à ce qui se passe pour un aéronef. Il est connu que cette force est proportionnelle au carré de la vitesse. La seconde est très spécifique aux bateaux et provient des vagues créées à la surface par leur déplacement et que l'on appelle le sillage. Ces vagues ont une longueur d'onde principale directement liée à la vitesse et lorsque cette longueur d'onde dépasse celle du bateau celui-ci doit en quelque sorte « monter » sur sa vague d'étrave, ce qui produit une très forte augmentation de la traînée. On considère ainsi que les bateaux archimédiens ont une vitesse limite proportionnelle à la racine carrée de leur longueur. Pour un bateau de 10 m cette vitesse limite est d'environ 8 kt et la traînée est alors de l'ordre de 10% du poids.

Si la puissance de propulsion, à moteur ou à voile, est suffisante le bateau peut dépasser cette vitesse limite et entre alors en régime « planant ». La carène se comporte alors comme une aile dont seul l'intrados serait portant. La traînée dépend alors essentiellement de la surface mouillée, qui est généralement fortement réduite par rapport au régime archimédien, et de l'incidence de la carène qui permet d'équilibrer le poids. Si la forme de la carène est bien dessinée (forme planante), la traînée n'augmente presque plus en fonction de la vitesse au début de cette phase. Hélas, l'équilibre du centre de poussée hydrodynamique par rapport au centre de gravité fait que lorsque la vitesse augmente, l'incidence de la carène doit diminuer ce qui empêche de réduire la surface mouillée. De ce fait la traînée finit par revenir sur une loi sensiblement proportionnelle au carré de la vitesse.

Avec des foils, il est évident que leur surface mouillée augmente la traînée dans la phase archimédienne. Mais quand leur portance augmente ils soulagent la poussée d'Archimède et réduisent la traînée de vague. Mais leur bénéfice apparaît surtout « en vol » lorsqu'ils supportent tout le poids du bateau. Leur surface étant en général très inférieure à celle de la carène, le bénéfice en traînée de frottement est très important. En contrepartie apparaît une composante de traînée induite par la portance hydrodynamique. Et, comme pour les ailes des avions, il faut avoir le plus d'allongement possible des foils pour minimiser cette composante. Si de plus le foil traverse la surface avec un dièdre classiquement de l'ordre de 45° (voir illustration de L'Hydroptère), l'augmentation de la portance en fonction de la vitesse est compensée par une élévation du bateau qui réduit la surface immergée du foil

sans avoir besoin de modifier l'incidence : plus le bateau va vite et plus il vole haut... donc avec une surface mouillée plus faible ! En contrepartie il y a quand même une légère augmentation de la traînée induite par la portance du fait de la réduction simultanée de l'allongement des foils. Mais, au bilan global, la traînée d'un hydroptère est pratiquement constante sur une large plage de vitesse au-delà du décollage, ce qui est très avantageux par rapport à une coque planante.

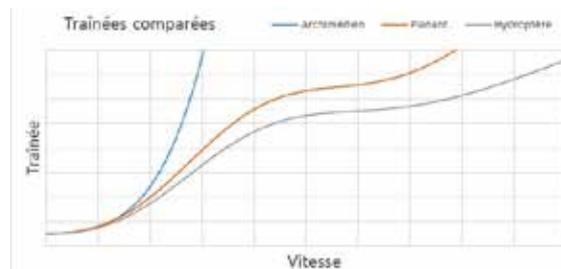


Diagramme comparé des traînées de bateaux archimédiens, planants ou à foils

La faible traînée à grande vitesse est donc l'avantage majeur des hydroptères. Mais la conception d'un tel bateau pose quand même des problèmes très spécifiques. Un des premiers est le mode de propulsion. On comprend facilement qu'une hélice située au bout d'un arbre dans l'axe du moteur ne peut pas permettre au bateau de voler bien haut. D'ailleurs les premiers hydroptères étaient propulsés par une hélice aérienne. Pour des raisons d'encombrement et de sécurité il est évidemment préférable d'avoir une hélice marine. Mais alors la question se pose de la position du moteur : il peut être en pod immergé dans l'axe de l'hélice mais au prix d'une accessibilité très réduite et d'un volume immergé source de traînée supplémentaire ; s'il reste dans la carène c'est au prix d'une transmission plus complexe et moins fiable. L'hydrojet est une autre solution qui nécessite une prise d'eau au niveau des foils pour remonter l'eau au niveau de l'hélice carénée placée dans la carène en face du moteur. Ce problème ne se pose évidemment pas pour les hydroptères à voile dont la propulsion est, par nature, aérienne !

Un autre problème spécifique des hydroptères est celui de la stabilité en vol, aussi bien en roulis qu'en tangage. En roulis, la hauteur du centre de gravité par rapport au plan des surfaces portantes actives, d'autant plus forte que le bateau vole haut, fait que la stabilité naturelle que l'on obtient sur un avion ne peut pas être obtenue avec des foils totalement immergés. Il faut alors soit ajouter des gouvernes sur les foils et créer de la stabilité artificielle par un asservissement, soit avoir des foils traversant la surface de façon à ce que leur portance varie avec leur enfoncement. On peut aussi noter une solution astucieuse qui permet d'asservir la profondeur d'un foil. Elle

SCIENCES ET TECHNIQUES AÉROSPATIALES

LES BATEAUX QUI VOLENT

consiste à lier le calage d'une partie du foil (volet de bord de fuite par exemple) à un palpeur qui suit la surface libre par une simple tringlerie mécanique. Le calage augmente si le foil s'enfonce et réciproquement. Cette solution a été beaucoup utilisée pour résoudre les problèmes de stabilité. Elle a cependant les inconvénients d'ajouter une mécanique fragile et exposée à des débris de surface et de ne pas permettre la réduction de la surface mouillée lorsque la vitesse augmente, donc de limiter le potentiel de performance. En général la stabilisation en roulis conduit à faire des foils dont l'envergure dépasse la largeur de la carène. Pour des voiliers, un bateau comme l'Hydroptère obtient une stabilité naturelle en roulis avec des foils en V qui traversent la surface libre avec un dièdre de l'ordre de 40° et une largeur beaucoup plus importante qu'un catamaran de mêmes longueur et déplacement.



L'Hydroptère à plus de 90km/h © Gilles Martin-Baget

Concernant le tangage, les critères de stabilité en vol sont proches de ceux d'un avion. On retrouve en particulier la notion de foyer qui correspond à la position la plus arrière du centre de gravité qui assure la stabilité. Cette notion n'existe pas sur les bateaux archimédiens et peut déstabiliser des marins qui craignent de plonger de l'avant en avançant trop le centre de gravité ou qui pensent qu'en le reculant on peut faire cabrer le bateau pour le faire voler plus haut. La variation de la portance des foils avec leur enfoncement participe également à cette stabilité.

Enfin les foils sont soumis à deux phénomènes particuliers inconnus des aérodynamiciens : la ventilation et la cavitation.

La ventilation provient de la proximité de la surface libre avec les zones de faibles pressions à l'extrados des foils. En effet, en raison de la forte masse volumique de l'eau, la pression dans ces zones est souvent très inférieure à la pression atmosphérique, même en tenant compte de la composante hydrostatique apportée par la profondeur. On comprend alors que s'il existe une communication entre ces zones et la surface, elles peuvent être envahies par de l'air à la pression atmosphérique qui prend la place

de l'eau à l'extrados à une pression qui peut être beaucoup plus faible. Il en résulte alors une forte chute instantanée de portance. Les foils traversant la surface sont évidemment plus sujets à la ventilation. Ce phénomène a été très peu étudié pour de tels foils et reste difficile à modéliser par CFD car il est généralement associé à deux états stables dans les mêmes conditions : avec et sans ventilation. Il dépend peu de la vitesse elle-même mais plutôt de la cartographie des zones à faible coefficient de pression ($P/1/2\rho V^2$ où P est la pression statique locale, ρ la masse volumique de l'eau et V la vitesse du bateau) par rapport à la surface.

La cavitation se manifeste de façon très semblable à la ventilation mais par une physique totalement différente. Le seul point commun est la dépression créée à l'extrados des foils. À grande vitesse cette dépression peut passer en dessous de la pression de vapeur saturante de l'eau. Celle-ci se vaporise alors et il se crée une bulle de vapeur d'eau à l'extrados du foil. Si l'on augmente la vitesse ou l'incidence du foil cette bulle s'étend progressivement à tout l'extrados et peut même se prolonger assez loin en arrière en créant un effet de culot. Mais dans ces conditions l'extrados ne contribue plus à l'augmentation de portance et l'effet de culot augmente fortement la traînée. La recondensation de la bulle a lieu de façon implosive au point de pouvoir sérieusement détériorer la surface concernée. Ce phénomène est bien connu des fabricants d'hélices. Pour des foils, avec un coefficient de pression de 0,5 à l'extrados, on atteint le seuil de début de cavitation vers 40 kt. Pour atteindre des vitesses bien plus importantes il faut alors utiliser des profils « supercavitant » conçus pour fonctionner avec un extrados totalement à la pression de vapeur saturante. De tels profils ont leur zone de fonctionnement optimal pour des coefficients de portance et avec des finesses bien inférieurs à ceux des profils classiques. Bien que la physique soit totalement différente, il y a une certaine analogie de conséquences entre les écoulements supersoniques et la cavitation.

Tous les bateaux rapides font également face au problème de l'état de la mer : traverser un champ de bosse à grande vitesse est forcément éprouvant. Le comportement des bateaux est une combinaison de modes typiques. Dans un premier mode le bateau suit le profil de la mer : c'est le cas lorsque le bateau est sur une houle longue de grande période de rencontre, typiquement plusieurs secondes. Lorsque la période de rencontre diminue les accélérations verticales qui permettraient de suivre la mer augmentent rapidement au point que le bateau peut finir par décoller sur la crête des vagues, ce qui est une des figures favorites des planches à voile et des kite-surfs. Mais si le bateau est assez lourd il peut arriver dans un mode où il « traverse » les vagues avec peu de mouvement vertical. Le partage entre les deux modes dépend essentiellement de la

SCIENCES ET TECHNIQUES AÉROSPATIALES

LES BATEAUX QUI VOLENT

raideur à l'enfoncement rapportée à la masse du bateau en fonction de la période de rencontre. Les coques planantes ont un très faible tirant d'eau donc une très forte raideur à l'enfoncement rapportée à la masse : un faible écart d'enfoncement induit une forte accélération de rappel. Avec un tirant d'eau de 20 cm, un bateau qui « traverserait » des vagues de 20 cm de creux subirait des accélérations verticales de +/-0,5 g. Sauf dans le cadre d'une compétition, le confort des passagers oblige à réduire la vitesse bien avant ce seuil. Pour un foil traversant la surface la variation de poussée verticale induite par les variations d'enfoncement se répartie sur l'envergure immergée et la raideur à l'enfoncement est beaucoup plus faible. De ce fait un hydroptère peut traverser des creux beaucoup plus importants qu'une coque planante... à condition que la hauteur de vol de la carène soit suffisante. C'est ainsi que, dans la deuxième moitié du XXème siècle, un certain nombre d'hydroptères de transport de passagers ont été en service sur des plans d'eau plus ou moins abrités. On peut citer entre autres une liaison Ouessant-Continent, des liaisons entre les îles grecques ou Hawaï, autour de la mer Baltique ou sur de grands lacs intérieurs. Boeing en particulier a commercialisé le Boeing 929 propulsé par hydrojets qui pouvait transporter jusqu'à 400 passagers. Cependant ce mode de transport n'a jamais supplanté les navires plus conventionnels, malgré sa vitesse, sans doute en raison des conditions de mer qui limitaient trop souvent son emploi.



Boeing 929

Depuis quelques décennies l'usage des foils est revenu d'actualité par le biais des voiliers de course. En effet les progrès des matériaux, composites en particulier, ont permis un allègement considérable des structures et une meilleure performance des voiles qui ont rendu possible le décollage d'hydroptères à voile. Les premiers hydroptères à voile ont été conçus pour les records de vitesse sur

plan d'eau parfaitement calme. Ainsi dès 1956, l'hydroptère américain Monitor a été chronométré à plus de 30 kt. Mais le premier hydroptère à voile conçu pour des traversées océaniques est l'Hydroptère d'Alain Thébault, mis à l'eau en 1994, qui a traversé la Manche entre Douvres et Calais à 33,3 kt (61km/h) de moyenne et a battu le record absolu de vitesse à la voile sur 500 m en 2009 à plus de 51 kt (95km/h) en rade d'Hyères avec 30 kt de vent et près de 1 m de clapot. Bien qu'il n'ait pas pu battre le record de l'Atlantique pour lequel il avait été conçu avec le soutien d'Eric Tabarly, les performances et les images de l'Hydroptère ont marqué le milieu de la voile et les foils sont maintenant incontournables sur tous les voiliers de compétition. Parmi les plus spectaculaires, tout le monde a vu des images des deux dernières éditions de la Coupe de l'America avec des catamarans qui volent à 40 kt par 20 kt de vent réel. Leur configuration est cependant très différente de celle de l'Hydroptère pour des raisons de jauge qui limite strictement la largeur. De ce fait les architectes ont été contraints de dessiner des foils qui traversent la surface verticalement. Le bateau n'a donc aucune raideur naturelle d'enfoncement en vol et le contrôle de la hauteur de vol est assuré par le pilotage des foils en incidence avec l'assistance d'équipiers qui « moulinent » les winches en permanence pour remplir l'accumulateur hydraulique de puissance.



Entraînement pour la Coupe de l'America

Le record du monde de vitesse à la voile avait été repris à l'Hydroptère dès 2010 par Alex Caizergues en kite-surf. Mais il a depuis été pulvérisé par l'australien Paul Larsen à 65,45 kt (121 km/h) avec Vestas Sailrocket, un engin dissymétrique original dont le foil fonctionne à l'envers en tirant le bateau vers le bas pour permettre de tirer plus de puissance de la voile. Il est intéressant de noter que Paul Larsen a établi son record avec seulement 25 kt de vent réel ce qui illustre la finesse remarquable de son engin.

SCIENCES ET TECHNIQUES AÉROSPATIALES

LES BATEAUX QUI VOLENT



Vestas Sailrocket dans les conditions du record de vitesse à 121 km/h

Du côté des hydroptères à moteur, plusieurs équipes ont actuellement en projet des appareils de la taille d'une automobile destinés à transporter quelques personnes sur des plans d'eau calmes. La Ville de Paris s'intéresse en particulier au projet de Seabubble, à propulsion électrique pour servir de bateau-taxi sur la Seine.

Dans ce cas l'avantage des foils est de produire moins de traînée et moins de sillage qu'un bateau conventionnel de même capacité. Cependant sur la Seine dans Paris la vitesse des bateaux est limitée à 18 km/h, ce qui ne permet pas de tirer le meilleur parti des foils. Mais il existe aussi de très nombreuses villes au monde situées autour d'un plan d'eau abrité sur lequel la limitation de vitesse est beaucoup moins stricte et où les foils pourraient être adaptés au mieux de leurs performances.

Ce sont bien les progrès technologiques tirés par l'industrie aéronautique, en particulier dans le domaine des matériaux, qui ont permis aux bateaux de voler et on peut dire que tous les projets innovants dans ce domaine ont été soutenus par cette industrie.



Seabubble à Saint-Tropez. © Francis Demange

Si, du point de vue de la Mécanique des Fluides, l'eau et l'air à basse vitesse ont des comportements tout à fait semblables, c'est surtout le fait de naviguer à l'interface entre ces deux éléments qui fait la spécificité des bateaux volants. Et les vagues qui agitent cette interface sont le principal défi à relever. Il est difficile d'imaginer un renouveau des hydroptères pour le transport de passagers sur des mers ouvertes. Mais les foils sont désormais incontournables pour les voiliers de compétition et il est assez probable que les hydroptères deviennent des moyens de transport communs sur des plans d'eau abrités. Et l'industrie aéronautique restera évidemment un acteur majeur de ces innovations. ■

Directeur de la publication : Président 3AF : Louis Le Portz

Président du Haut conseil scientifique : Bruno Chanetz

Rédaction :

Henry de Pinval

Jean Hermetz

Arnaud Le Pape

Michel Aguilar

Arnaud Violland

Philippe Perrier

Conception graphique Lettre 3AF : ICI LA LUNE

Mise en page : Caroline Saux

Publication - Novembre 2021



Association Aéronautique
Astronautique de France

6, rue Galilée - Paris

Tél. : 01 56 64 12 30

Fax : 01 56 64 12 31

Email : gestionmembres@aaaf.asso.fr

www.3af.fr

