

UNIVERSITÉ D'AIX-MARSEILLE
FACULTÉ DE DROIT ET DE SCIENCE POLITIQUE

PÔLE TRANSPORTS
INSTITUT DE FORMATION UNIVERSITAIRE ET DE RECHERCHE DU TRANSPORT AÉRIEN
(IFURTA)

LA MOBILITE URBAINE AERIENNE, UTOPIE OU REALITE ?

Mémoire pour l'obtention du
Master 2 Droit et Management du Transport Aérien

par

Romain PARISOT
Sous la direction de Madame Julie LABORDE DIT BOURIAT

Année universitaire 2022-2023

UNIVERSITÉ D'AIX-MARSEILLE
FACULTÉ DE DROIT ET DE SCIENCE POLITIQUE

PÔLE TRANSPORTS
INSTITUT DE FORMATION UNIVERSITAIRE ET DE RECHERCHE DU TRANSPORT AÉRIEN
(IFURTA)

LA MOBILITE URBAINE AERIENNE, UTOPIE OU REALITE ?

Mémoire pour l'obtention du
Master 2 Droit et Management du Transport Aérien

par

Romain PARISOT
Sous la direction de Madame Julie LABORDE DIT BOURIAT

Année universitaire 2022-2023

Remerciements

Avant tout développement, il apparaît opportun de commencer ce mémoire par des remerciements, à ceux qui m'ont beaucoup appris et aidé dans mes recherches.

Je tiens à remercier dans un premier temps toute l'équipe pédagogique du Pôle Transport et les intervenants professionnels responsables de la formation dispensée à l'IFURTA, pour avoir assuré la partie théorique de celle-ci.

Je remercie également Madame Julie LABORDE DIT BOURIAT, directrice du Master 2 : Droit et Management du Transport Aérien pour son accompagnement dans le cadre de la rédaction de ce mémoire.

Un grand merci à M. ALLAIN Thierry, Directeur de programme Innovation DSAC -point focal eVTOL, pour le temps qu'il m'a consacré dans le cadre de mes recherches.

Sommaire

REMERCIEMENTS	5
SOMMAIRE	7
TABLE DES ABRÉVIATIONS.....	9
INTRODUCTION	11
PARTIE 1 : LA TECHNOLOGIE EST-ELLE SUFFISAMMENT MATURE POUR PROPOSER UNE OFFRE DE MOBILITÉ AÉRIENNE URBAINE INTÉRESSANTE ?	21
TITRE 1 : DE NOUVEAUX SYSTÈMES DE PROPULSIONS	23
TITRE 2 : UNE NOUVELLE SOURCE D'ÉNERGIE.....	27
<i>Chapitre 1 : Les batteries pourront-elles être certifiées aisément ?</i>	<i>28</i>
<i>Chapitre 2 : Les batteries sont-elles suffisamment performantes pour offrir l'autonomie nécessaire aux opérations envisagées ?</i>	<i>31</i>
TITRE 3 : UNE AVIONIQUE DE POINTE	34
<i>Chapitre 1 : Les systèmes de commande de vol autonome</i>	<i>37</i>
<i>Chapitre 2 : Les systèmes de communication</i>	<i>41</i>
PARTIE 2 : LA RÉGLEMENTATION EST-ELLE ADAPTÉE POUR PERMETTRE LE DÉVELOPPEMENT DES TAXIS VOLANTS ?	45
TITRE 1 : A QUELLES CONDITIONS DOIVENT RÉPONDRE LES CONSTRUCTEURS ?	48
TITRE 2 : QUELLE EST LA RÉGLEMENTATION APPLICABLE POUR LA CERTIFICATION DES APPAREILS ?	49
<i>Chapitre 1 : Aux Etats-Unis.....</i>	<i>50</i>
<i>Chapitre 2 : En Europe</i>	<i>53</i>
TITRE 3 : L'OPÉRATEUR DEVRA-T-IL PRENDRE DES DISPOSITIONS PARTICULIÈRES ?	58
PARTIE 3 : L'INTÉGRATION DES EVTOL DANS LE PAYSAGE URBAIN EST-ELLE ENVISAGEABLE MALGRÉ LES CONTRAINTES AUXQUELLES ILS SONT CONFRONTÉS ?	63
TITRE 1 : LES INFRASTRUCTURES SONT-ELLES PRÊTES ET ADAPTÉES ?	64
<i>Chapitre 1 : A quelles normes doivent répondre les infrastructures ?</i>	<i>66</i>
<i>Chapitre 2 : Comment va-t-il être décidé des emplacements des vertiports ?</i>	<i>69</i>
TITRE 2 : COMMENT LES CONTRÔLEURS AÉRIENS VONT-ILS ORGANISER LES FLUX DE NAVETTES AÉRIENNES EN ZONE URBAINE ?	74
<i>Chapitre 1 : Des procédures de décollage et d'atterrissage précises</i>	<i>75</i>
<i>Chapitre 2 : La gestion du trafic aérien En-route.....</i>	<i>77</i>
TITRE 3 : LES HABITANTS DES DIFFÉRENTES MÉTROPOLIS SONT-ILS PRÊTS À ACCEPTER CE TYPE DE MOBILITÉ ?	80

<i>Chapitre 1 : Les nuisances sonores, visuelles et vibratoires.....</i>	<i>83</i>
<i>Chapitre 2 : L'impact environnemental</i>	<i>85</i>
<i>Chapitre 3 : L'impact économique.....</i>	<i>86</i>
CONCLUSION.....	91
BIBLIOGRAPHIE	93
ANNEXES.....	103
TABLE DES MATIÈRES	135

Table des abréviations

AAM : Advanced Air Mobility

ADP : Aéroport de Paris

CAI : Certification Action Item

CRI : Certification Review Item

CTOL : Conventional Take-Off and Landing

eCTOL : Electric Conventional Take-Off and Landing

DGAC : Direction Générale de l'Aviation Civile

EASA : European Aviation Safety Agency

FAA : Federal Aviation Administration

IFR : Instrumental Flight Rules

RATP : Régie autonome des Transports Parisiens

UAM : Urban Air Mobility

UAS : Unmanned Aircraft System ou Système d'Aéronefs sans Pilote

VFR : Visual Flight Rules

VTOL : Vertical Take-Off and Landing

eVTOL : Electric Vertical Take-Off and Landing

Introduction

I. Contexte

Nous sommes en 2023, cinq siècles après les premières études scientifiques de Léonard de Vinci et deux millénaires après la légende d'Icare dans laquelle l'Homme imaginait déjà voler, l'aviation fait partie intégrante de nos vies, du monde et les progrès sont impressionnants. Nous voyageons couramment dans des avions de plusieurs dizaines de tonnes à travers le monde, ce n'est plus une aventure risquée réservée aux personnes les plus aisées.

Aujourd'hui, les avions sont équipés de commandes de vol électrique de haute technologie, ils sont automatisés et capables de faire un vol - du décollage à l'atterrissage - sans l'intervention d'un pilote. Les technologies permettant l'autonomie du vol et les services de données progressent constamment.

De nombreux systèmes d'aéronefs sans pilotes (UAS) sont présentés dans les différents salons aéronautiques et des partenariats voire des essais se font entre les constructeurs et des sociétés spécialisées. Par exemple : En 2019, un partenariat a été conclu entre DHL, transporteur « expressiste » et Ehang, société de véhicules aériens autonomes pour développer et mettre en place des solutions de livraison par drone. Plus précisément pour la livraison dite dernier kilomètre, la plus coûteuse pour le transporteur. Les premiers résultats prouvent la faisabilité de ce projet. Pour un trajet de huit kilomètres, le temps de livraison est raccourci de 30 minutes, les coûts de livraison sont 80% moins importants et l'empreinte carbone du transport est réduite (livrer avec un drone électrique émet forcément moins de gaz à effet de serre qu'une camionnette alimentée en carburant fossile).

Nous allons entrer dans une nouvelle aire où les pilotes seront de moins en moins présents, malgré leur lourde formation et leurs compétences. L'exemple donné précédemment pour la livraison de colis appuie cette ambition. Le drone remplace le chauffeur-livreur pour la

livraison des colis. Ce concept de livraison par drone s'intègre pleinement dans l'Advanced Air Mobility (AAM) ou la mobilité aérienne avancée.

L'usage du drone dans les activités futures n'est pas seul, les entreprises du milieu aéronautique travaillent également sur le développement de taxis aériens urbains, via les eVTOL. Ces aéronefs sont conçus dans le but de proposer un moyen de transport urbain complémentaire à l'offre actuelle (bus, métro, taxis, vélo...). Les aéronefs seraient donc de plus en plus présents dans la vie quotidienne des citoyens.

Constructeurs et opérateurs voient un potentiel marché dans l'offre de navettes aériennes à la demande pour effectuer des trajets dans les grandes métropoles internationales. Plusieurs raisons les font croire en l'émergence de ce secteur dans les prochaines années : saturation des voies terrestres, empreinte environnementale, gain de temps, etc.

C'est pourquoi nous pouvons dénombrer plus de 350 projets de taxis volants à travers le monde, proposés par une multitude d'entreprises, plus ou moins spécialisées dans l'industrie aéronautique. De nombreuses start-ups et entreprises émergent tout au long de la chaîne de valeur, des fabricants d'équipements d'origine aux constructeurs d'eVTOL. Certaines entreprises se démarquent : Volocopter, Joby, Lilium, Airbus ou encore Ehang.

Bien plus que des concepts, de nombreuses entreprises de biens et de services collaborent avec les régulateurs dans le cadre de l'élaboration d'un cadre juridique pour permettre le développement des eVTOL. Ils collaborent dans le cadre de discussions et de colloques autour de différents sujets, mais pas seulement. Ils mettent aussi en pratique et expérimentent des essais dans le but d'obtenir des réponses concrètes à leurs questions. Les projets pilotes européens ont lieu à Francfort, Paris, Cologne, Düsseldorf, Linz ou encore Helsinki. À Paris par exemple, un consortium d'entreprises regroupant une trentaine d'acteurs industriels, académiques et réglementaires dont la DGAC, Volocopter, Skyports, ADP, la RATP et la région de Paris réalise des essais sur l'aérodrome de Pontoise-Cormeilles-en-Vexin. Ces essais ont pour but de pouvoir évaluer de façon précise les risques et avantages des eVTOL, de déceler des problèmes

encore inconnus et de préparer la démonstration de taxi aérien prévue pour les Jeux olympiques de 2024.

La démonstration prévue pour les Jeux olympiques ne sera que la prémisse du futur de la mobilité urbaine. Ce sera également l'occasion de présenter le savoir-faire européen et la compétence de la France de faire voler un aéronef nouveau devant le reste du monde. Une véritable prouesse dans cette course à l'innovation.

Certains des systèmes de véhicules aériens en sont déjà à des stades avancés de certification. Accompagnés par les régulateurs et d'autres entités nationales, les constructeurs conçoivent des aéronefs de plus en plus proches de la réglementation qui se rédige. La figure 1 en annexe présente le calendrier de certification des aéronefs de transport de passagers en zone urbaine pour différentes entreprises.

Nous allons donc développer, à travers ce mémoire, les freins qui se dressent devant les intéressés et les solutions que l'on pourrait apporter pour permettre le développement des eVTOL.

II. Définitions

Avant d’approfondir le vaste sujet qu’est la mobilité urbaine aérienne, il convient de définir les termes clés du sujet que nous allons traiter. Vous trouverez ci-dessous quelques définitions importantes.

Utopie :

« Conception ou projet qui paraît irréalisable. »¹

Réalité :

« Caractère de ce qui est réel, de ce qui existe effectivement. »²

Mobilité :

Le terme de mobilité renvoie au mouvement, au déplacement ou au transport. Ces déplacements impliquent des notions de point de départ, de destination, de trajet, de moyens de transport, de motif (professionnel ou à titre de loisir), de fréquence, de flux, de fréquentation, de saturation, d’embouteillage...

La mobilité peut donc se résumer à l’ensemble des déplacements de personnes, regroupant tous les trajets, toutes les durées, tous les moyens de transport et les services associés. C’est donc tous les flux de personnes.³

¹ Dictionnaire Le Robert

² Dictionnaire Larousse

³ VELCO, « Mobilité urbaine : la définition »

Disponible sur : <https://velco.tech/fr/mobilite-urbaine-definition/>

Mobilité urbaine :

La mobilité urbaine se définit par l'ensemble des flux de déplacement au sein d'une ville. L'ensemble des déplacements inter-urbains seront donc exclus (moyens de transport grande distance comme le train ou l'avion).

Afin de définir sa politique de mobilité, chaque commune tient compte des déplacements quotidiens et habituels des citoyens. Chaque ville aborde aujourd'hui le sujet avec sérieux pour répondre aux besoins de ses habitants et aux enjeux du XXI^e siècle (écologie, économie, sécurité...).

La mobilité urbaine regroupe de nombreux moyens de locomotions : Motorisés (Bus, voiture, moto, métro, tramway...) ou non (vélo, trottinette, roller...)⁴

Electric Vertical Take-off and Landing (eVTOL) ou aéronef électrique à décollage et atterrissage vertical :

Les aéronefs eVTOL sont des aéronefs électriques qui décollent et atterrissent verticalement. Ils sont également appelés taxis aériens ou taxis volants. Alimentés par des batteries, les eVTOL volent de façon similaire aux hélicoptères.⁵

« At the end of the day, it's a very simplified electric helicopter »⁶

⁴ VELCO, « Mobilité urbaine : la définition », Disponible sur : <https://velco.tech/fr/mobilite-urbaine-definition/>

⁵ J. Biba, « What are eVTOLs? Are they the futur of aviation? », BuiltIn, Février 2023 Disponible sur : <https://builtin.com/transportation-tech/evtol-aircraft>

⁶ Traduction : « En fin de compte, c'est un hélicoptère électrique très simplifié », R Plaut, (PDG de la société d'eVTOL AIR) à BuiltIn

Avionique :

1. Ensemble des techniques (électronique, informatique, automatique) appliquées à l'aviation
2. Ensemble des équipements techniques à bord d'un avion⁷

Advanced Air Mobility (AAM) ou Mobilité aérienne avancée :

L'Advanced Air Mobility est un système de transport aérien innovant (l'innovation étant l'action d'innover ; Chose nouvellement introduite⁷), qui intègre de nouvelles conceptions d'aéronefs et des technologies de vol dans l'espace aérien. L'objectif de l'AAM est de déplacer plus efficacement les personnes et les marchandises entre les lieux, particulièrement dans des environnements régionaux, urbains et ruraux encore mal desservis ou saturés.

L'AAM propose des aéronefs électriques et autonomes. Cela ne concerne pas tous les concepts d'aéronefs mais la plupart ne nécessiteraient pas de pilote(s) à bord.

Nous retrouvons trois types d'aéronefs dans la mobilité aérienne avancée et ses concepts :

- Les aéronefs électriques à décollage et atterrissage conventionnels (eCTOL) utilisés pour des voyages courtes distances ou des transferts entre deux aéroports ;
- Les aéronefs électriques à décollage et atterrissage verticaux (eVTOL) qui se destinent à un usage urbain sous forme de taxis aériens à la demande, ou encore pour le transfert de patient entre deux hôpitaux. Les différents constructeurs proposent des aéronefs ayant besoin d'un pilote, d'un télépilote ou des aéronefs totalement automatisés ;
- Les systèmes d'aéronefs sans pilote(s) ni passagers à bord, plus communément les drones (UAS) dont l'usage pourrait être la vidéographie, la livraison de petits colis ou de matériel médical.⁸

⁷ Dictionnaire Le Robert

⁸ BAE Systems, « What is Advanced Air Mobility? »

Disponible sur : <https://www.baesystems.com/en-us/definition/what-is-advanced-air-mobility>

Urban Air Mobility (UAM) ou Mobilité urbaine aérienne :

L'UAM est un nouveau système de transport aérien sûr, sécurisé et plus durable pour les passagers et le fret en milieu urbain, rendu possible par les nouvelles technologies et intégré dans les systèmes de transport multimodaux. Le transport est effectué par des aéronefs électriques décollant et atterrissant à la verticale, télépilotés ou avec un pilote à bord.⁹

L'UAM fait partie intégrante de l'AAM. L'AAM va concerner l'ensemble des innovations pour la mobilité aérienne, qu'elles concernent la mobilité urbaine ou non. En soi, les avancées réalisées pour l'UAM peuvent apporter des solutions pour le transport en zones rurales et régionales.

La figure 2 en annexe compare l'AAM et l'UAM dans l'usage et la distance franchissable en fonction des définitions données par différents organismes ou entreprises.

Vertiport :

Site aménagé pour le décollage et l'atterrissage verticaux d'aéronefs et équipé pour offrir des services d'accueil des passagers et de réception du fret. Un vertiport peut être aménagé pour différents types d'aéronefs tels que des hélicoptères ou des drones.¹⁰

⁹ EASA, infographie « What is UAM »

Disponible sur : https://www.easa.europa.eu/sites/default/files/dfu/infographic_1_-_what_is_uam_download.pdf

¹⁰ France Terme, *Ministère de la culture*

III. Présentation du sujet

La mobilité aérienne urbaine, utopie ou réalité ?

Les avis divergent quant à la possibilité qu'un service de navettes aériennes voie le jour à court terme. Les raisons sont multiples et relèvent souvent de problématiques juridico-pratiques. En effet, les nouvelles technologies permettent de proposer des aéronefs adaptés à la mobilité aérienne urbaine. Les quelque 350 projets de taxis volants et la certification en cours de certains appareils prometteurs prouvent que l'ingénierie aéronautique répond aux besoins de ce nouveau marché. Bien que les outils et matériaux utilisés soient prometteurs et devraient offrir de plus en plus de possibilités à l'avenir, les capacités techniques qu'ils laissent entrevoir devraient permettre d'atteindre les objectifs fixés par les constructeurs en matière de fiabilité, d'autonomie et de confort.

Prenons le cas des drones qui entrent dans le spectre de la mobilité aérienne avancée et dont le marché est plus avancé que celui des eVTOL.

Ces dernières années, les drones ont démontré leur efficacité pour un usage professionnel (agriculture, livraison, vidéographie...). Des partenariats sont d'ailleurs nés entre des constructeurs et des opérateurs desdits secteurs. Nous avons brièvement évoqué le cas de DHL précédemment. Ce type de livraison fait partie intégrante du concept de la mobilité aérienne avancée et de nombreuses expérimentations sont en cours à travers le monde (en France, au Japon, en Australie, aux Etats-Unis...). Plus de 660 000 livraisons par drone ont eu lieu entre 2019 et 2021.

Transporter des colis par les airs n'est pas totalement acté, mais devrait le devenir dans les prochaines années. En France, la DGAC permet un vol par semaine pour qu'un drone livre un village dans le Var, ce qui permet au livreur de gagner une dizaine de minutes pour chaque colis.

Cette autorisation permet aussi aux régulateurs nationaux d'étudier les enjeux de la livraison par drone. En revanche, des questions techniques portant sur le volume et le poids des colis se posent encore et certains acteurs se retirent doucement du marché (fermeture du centre de recherche et développement d'Amazon en France par exemple). Cela laisse à penser que ce type de livraison se démocratisera moins vite que prévu. Nous pourrions toutefois espérer en voir dans les dix prochaines années.

Le défi que se lancent dorénavant les différents acteurs des eVTOL relève du transport de personnes. Ils souhaitent proposer un service de navette aérienne dans les grandes métropoles mondiales, la cible étant les usagers des transports en commun et les automobilistes. En France, en 2019, les Français effectuaient en moyenne trois déplacements par jour. Ce qui représente près de 181 millions de déplacements quotidiens et donc, un marché important pour la mobilité aérienne urbaine.

Les innovations des constructeurs ont démontré que la technologie répond globalement à leurs attentes. Nous sommes en mesure de concevoir des aéronefs électriques capables de transporter des passagers sur des distances plus ou moins longues. Finalement, les différents prototypes présentés durant les derniers événements aéronautiques démontrent la faisabilité technologique des projets. De plus, les régulateurs tels que l'EASA ou la FAA s'intéressent et travaillent sur le sujet des eVTOL pour rédiger des textes réglementaires portant sur la certification et l'opération de ces aéronefs. Cela appuie la possibilité que ces nouveaux moyens de transport voient le jour dans les prochaines années.

En revanche, cette nouvelle forme de mobilité soulève de nombreuses interrogations qui pourraient nous rappeler l'illusion que représentent ces projets. Bien que des constructeurs, des opérateurs, des régulateurs et d'autres entités publiques ou privées collaborent pour rédiger un cadre juridique, de nombreux sujets sont sans réponse et restent en suspens. Parmi la multitude de questions que nous pourrions nous poser, nous pouvons évoquer la fiabilité des nouvelles technologies utilisées et la certification des appareils, la sécurité des usagers et des riverains en

cas de défaillance critique, le contre-terrorisme notamment lors du survol de capitales, la gestion du trafic aérien, les problématiques d'espace et d'infrastructures, l'impact positif ou négatif qu'aura leur développement sur l'environnement et les populations locales...

À travers ce mémoire, nous allons chercher à solutionner les obstacles à la mobilité urbaine aérienne pour faire passer le statut des projets de taxis volants de rêve à réalité. Nous essaierons également de proposer un modèle d'intégration dans le paysage urbain qui ne brusquerait pas les populations locales, parfois réticentes.

Nous ferons donc dans une première partie un état des lieux technologique et chercherons à savoir si celle-ci est suffisamment mature pour répondre aux besoins de cette nouvelle forme de mobilité. Nous verrons que l'innovation permet de proposer une source d'énergie alternative au kérosène, que de nouveaux systèmes de propulsions sont en cours de certification et que les systèmes électroniques et informatiques qui équiperont les eVTOL sauront proposer de nouvelles fonctionnalités.

Ensuite, nous nous pencherons sur la réglementation pour définir le cadre actuel et chercherons à connaître les axes de progrès pour permettre le développement des eVTOL. Pour ce faire, nous étudierons la réglementation applicable pour la certification des appareils et pour leur opérabilité en zone urbaine.

Enfin, nous essaierons de proposer un processus d'intégration des eVTOL dans le cadre d'un service de taxi aérien. Nous verrons que les obstacles au développement des eVTOL ne relèvent pas seulement des infrastructures, encore « inexistantes ». De nombreuses questions se posent encore quant au trafic aérien et à l'acceptabilité des populations locales.

Partie 1 : La technologie est-elle suffisamment mature pour proposer une offre de mobilité aérienne urbaine intéressante ?

Depuis l'émergence du transport aérien, les innovations sont nombreuses et en constante évolution. Le concept d'aéronef à décollage et atterrissage vertical existe depuis de nombreuses années puisque l'hélicoptère est un VTOL.

Le grand nombre d'entreprises travaillant sur les concepts d'eVTOL donnent lieu au dépôt de demande de brevet pour de nouveaux systèmes de propulsions. Aujourd'hui, nous pouvons relever trois nouveaux systèmes de propulsion majeurs propres aux eVTOL. Nous verrons donc les avantages et inconvénients de ces trois systèmes de propulsions.

Nous étudierons ensuite les nouvelles sources d'énergie. Nous chercherons à savoir si elles sont adaptées pour faire voler les eVTOL. Quelques constructeurs proposent des aéronefs hybrides mais la plupart de ces aéronefs reposent sur une alimentation électrique.

Avec pour objectif la décarbonisation du transport aérien, les constructeurs investissent activement dans la recherche. Certaines portent sur le développement de nouvelles sources d'énergie, à savoir l'hydrogène ou l'électricité. L'électricité est exploitée par de nombreuses industries (informatique, automobile...) et stockée sur batterie. Les progrès technologiques des batteries électriques ces dernières années ont suscité un fort intérêt pour l'industrie aéronautique, mais pas seulement : des entreprises du secteur automobile et des start-ups se positionnent aussi sur le marché des eVTOL grâce à l'expérience acquise sur les batteries dans d'autres industries.

Enfin, nous verrons que ces nouveaux appareils disposeront d'une avionique de pointe (systèmes de communication, automatisation des commandes de vol). Ces nouvelles technologies remettent en question le rôle de l'Homme à bord des aéronefs, et, de fait, suscitent des questions quant à la faisabilité et l'usage de celles-ci.

Titre 1 : De nouveaux systèmes de propulsions

Dans l'ensemble des projets et concepts, trois configurations ressortent pour les systèmes de propulsion qui diffèrent des hélicoptères actuels : multi-rotors, à rotors basculants et découplés-propulsives. Au lieu d'être propulsés par des turbines à réaction comme les hélicoptères, la motorisation des eVTOL repose sur des ensembles de rotors à entraînement électrique.

Ces trois configurations procurent des performances propres à chaque aéronef et, de fait, un usage différent comme le montre la figure 3 en annexe.

Les eVTOL multi-rotor (figure 4) sont des aéronefs généralement sans ailes dont le point fort est le vol stationnaire. L'absence d'aile ne leur permet pas de proposer un vol en croisière efficace. Silencieux, économique et faible en émission, ce système est le plus adapté pour un usage urbain. De plus, leur configuration ne permet pas d'atteindre des vitesses importantes pour un aéronef (inférieures à 150 km/h). Les unités de propulsion sont fixées en position et créent une portance en permanence. C'est l'option qui offre les distances de vol les plus courtes et c'est globalement le concept le plus simple, car il évite toute pièce mobile inutile (par exemple, le vecteur de poussée). Leur portée est donc réduite à moins de cent kilomètres. Les prototypes des constructeurs Ehang et Volocopter sont des aéronefs multi-rotor (figure 4c).

Les aéronefs à rotor basculant ou à poussée vectorielle (figure 5) peuvent effectuer des vols horizontaux et verticaux. Les eVTOL développés par Lilium Jet ou Joby disposent d'un système de rotation des hélices qui leur permet de décoller verticalement puis d'évoluer comme un avion pour atteindre des destinations situées à 300 km du point de départ. Le point négatif de ce type de motorisation repose sur l'effet de rotation de la motorisation. Cela nécessite de

nombreuses redondances pour permettre une sécurité optimale lors de cette phase critique. Cela induit évidemment de nombreux tests poussés et alourdit l'aéronef.

La principale différence entre les appareils de cette catégorie repose sur le choix des constructeurs pour définir si des « ventilateurs » ou des hélices généreront la poussée de l'appareil.

Les aéronefs de type « lift and cruise »¹¹ (configuration découplée-propulsive) dont un schéma se trouve en annexe (figure 6), les aéronefs sont équipés de deux systèmes de motorisation distincts. Le premier assurant le décollage vertical à l'aide d'hélices fixes. Le second assure le vol en croisière avec des moteurs ayant une poussée horizontale. Il est potentiellement plus facile à certifier que la poussée vectorielle car les systèmes de propulsion sont séparés. Cette configuration permet d'atteindre des vitesses allant jusqu'à 250 km/h et des destinations à près de 200 km. Les ailes créent la portance nécessaire pendant la phase de croisière. Nous retrouvons par exemple les eVTOL conçus par Aurora Flight Sciences ou par Kitty Hawk dans cette catégorie (figure 6c).

Deux chercheurs de polytechnique à Turin ont fait des recherches sur les eVTOL et leurs performances.¹² Pour ce faire, ils se sont intéressés aux aéronefs des sociétés E-Hang, Lilium Jet et de Kitty Hawk.

Chacun de ces appareils a une configuration différente parmi les trois concepts qui ressortent.

A partir des données communiquées par les constructeurs (dimensions, poids, autonomie...), et en supposant que les batteries qui équiperont ces appareils sont similaires à celles qui équipe les Tesla modèle S dont nous connaissons la puissance ; Ils ont fait une série d'équations dans trois

¹¹ Traduction : « Ascenseur et croisière »

¹² A. BACCHINI et E. CESTINO, « Electric VTOL Configurations Comparision », Aerospace 6 n°3.26, Février 2019
Disponible sur : <https://www.mdpi.com/2226-4310/6/3/26#B26-aerospace-06-00026>

situations différentes (missions de 7 km, 30 km et 100 km) pour aboutir à des résultats concrets sur ces appareils que vous trouverez en annexe (figure 7).

La comparaison des missions et de ces résultats montre que les multi-rotors nécessitent moins d'énergie pour les missions à courte portée. Pour la mission de 30 km, nous constatons que les performances durant les deux phases de vol (stationnaire et croisière) sont toutes aussi importantes. Pour la plus grande mission, l'efficacité en croisière est le critère décisif. Le modèle d'E-Hang n'est pas suffisamment performant pour effectuer des vols d'une centaine de kilomètres. L'eVTOL Cora a besoin de plus d'énergie pour effectuer le vol. Cela se justifie par la traînée parasite causée par les pylônes et les hélices de poussée verticale.

La configuration multi-rotors semble être la plus proche du marché et moins complexe que les deux autres concepts. Cependant, l'avantage de portée des deux derniers permet des missions impossibles à la configuration multi-rotors.

Les eVTOL disposeront de plusieurs moteurs et rotors afin d'optimiser les performances et d'offrir une redondance à des fins de sécurité. Pour voler, l'appareil disposera donc toujours de plus de rotors et de moteurs que nécessaire et disposera d'une solution de secours en cas de défaillance sur l'un d'eux. Ce choix de redondance choisi par les constructeurs leur permettra de répondre aux exigences de sécurités définies par les régulateurs pour la certification de leurs appareils.

La multitude de rotors permet aussi d'en faire fonctionner un plus grand nombre à moindre régime pour obtenir la même force de levée ou de poussée. Le bruit global généré serait alors moins important.

Enfin, les divers moteurs et la répartition des rotors tout autour de l'appareil permettent d'annuler les forces susceptibles de provoquer la rotation du fuselage. Par conséquent, il ne sera pas nécessaire de les équiper d'un rotor arrière, contrairement à la plupart des hélicoptères.

De plus, la redondance des moteurs et rotors assure un bon niveau de sécurité. Ces deux éléments sont considérés comme des parties critiques de l'aéronef. La défaillance d'un rotor sur un hélicoptère l'oblige à se poser en urgence grâce à l'autorotation. Là, ce ne sera pas le cas, l'appareil pourra continuer à voler si un ou plusieurs de ses moteurs tombent en panne.

Par exemple, le VoloCity de Volocopter est composé de 18 rotors. Si l'un d'eux tombait en panne, on le remarquerait à peine.

Ces concepts n'ont jamais été certifiés auparavant dans la mesure où ils sont nouveaux. C'est pourquoi les autorités régulatrices collaborent avec les constructeurs pour certifier ces appareils.

Pour un eVTOL, les régulateurs vont tenir compte de l'absence de critères de défaillance unique lors de la phase de certification. En revanche, ils vont parfois devoir ajouter des critères encore inexistants jusqu'à maintenant.

Par exemple, pour les aéronefs à rotor basculant, ils vont devoir considérer chaque phase de la rotation des hélices. Pour que la transition du vol vertical vers le vol horizontal puisse se faire en toute sécurité, chaque profil d'hélice est adapté à chaque appareil. De fait, les hélices sont différentes pour chaque appareil. Les constructeurs cherchent à trouver le compromis idéal entre aérodynamisme, performance et bruit, selon le type d'opérations visées. Constructeurs et régulateurs peuvent s'appuyer sur le tilt-rotor de l'aéronef V-22 Osprey, certifié et commercialisé depuis 1989.

Pour les concepts de type « lift and cruise » en revanche, le processus de certification des systèmes de propulsion ne sera pas le même dans la mesure où le système de poussée verticale ne répond pas aux mêmes besoins que celui en vol horizontal. L'un servant à fournir de la portance à l'appareil, l'autre fournissant la poussée. Par conséquent, les deux propulseurs ne seront pas forcément similaires car les durées d'utilisation et puissances nécessaires ne seront pas les mêmes.

Titre 2 : Une nouvelle source d'énergie

Presque tous les aéronefs proposés ont une motorisation électrique. Les technologies permettant une alimentation de ce type sont principalement issues de l'industrie automobile, plus particulièrement des voitures électriques. Un partenariat a d'ailleurs été noué entre Airbus et Renault pour concevoir des batteries de nouvelle génération plus performantes.

Pour pouvoir voler grâce à l'électricité, il faut nécessairement avoir un moteur électrique, des batteries pouvant stocker l'énergie et un système d'alimentation entre les deux modules. Étudions le cas de la voiture électrique et de son fonctionnement pour comprendre ce qui se passe pour un moteur électrique d'aéronef (dont le circuit sera globalement le même). Un schéma se trouve en annexe (figure 8).

Voici les étapes du circuit électrique :

1. L'électricité présente dans la borne de recharge entre dans le circuit du véhicule par le chargeur ;
2. L'énergie est ensuite stockée dans des batteries
3. L'énergie est ensuite convertie et adaptée aux capacités et besoins du moteur par un ordinateur de contrôle et de gestion de la puissance ;
4. Le moteur est alimenté et permet à la voiture de rouler.

Finalement, le système électrique est similaire pour les industries automobile et aéronautique. Le moteur, une fois alimenté d'une source d'énergie (essence, kérosène, électricité ou autre) pourra fonctionner comme prévu par son constructeur.

Chapitre 1 : Les batteries pourront-elles être certifiées aisément ?

Utiliser l'électricité pour faire voler un appareil est récent. C'est pourquoi les systèmes de motorisation, de stockage et d'alimentation doivent être certifiés avant d'être installés sur des appareils dans lesquels nous monterons. Parmi les nombreuses exigences de sécurité de l'EASA pour les eVTOL, l'une d'elles stipulera qu'il faudra avoir à bord un nombre suffisant de batteries pour garantir l'alimentation électrique même en cas de défaillance. L'EASA souhaite anticiper les évolutions futures en proposant des règles et exigences pérennes qui pourront être aisément adaptées.

Une proposition a été faite pour établir le cadre réglementaire adapté aux eVTOL. Cette proposition porte notamment sur la problématique des batteries au lithium. Certains experts interrogent sur une possible évolution de la certification propre aux batteries.

Les batteries lithium utilisées présentent des risques importants d'incendie. L'expérience passée le prouve, nombreux sont les téléphones qui ont pris feu. Ceci est généralement dû au surchauffage de la batterie parfois lié à une surutilisation par rapport à leurs capacités.

Les constructeurs doivent donc justifier de leur capacité à se poser en moins d'une minute en cas d'incendie et des parachutes équipent certains concepts.

Or, une utilisation pour permettre à un avion de voler demande énormément d'énergie et pourrait nécessiter des batteries volumineuses pour répondre à ce besoin.

De plus, les batteries nouvelle génération développées pour cette utilisation sont récentes et pourraient avoir des défauts de fabrication latents. Il est donc impératif de définir un programme de surveillance et d'entretien des batteries tout au cours de leur cycle de vie.

En outre, les batteries sont encore lourdes et, le poids d'un avion étant à son désavantage, il est à la fois nécessaire de rechercher des solutions pour les alléger, mais surtout, il serait judicieux de définir un programme d'essais en vol et au sol avec des simulations de problèmes sur une ou plusieurs batteries. Les batteries auront un espace important dans l'appareil et pourraient

impliquer un incendie rapidement non maîtrisé. Il est donc primordial de connaître le temps de réactivité maximale qu'auront les pilotes en cas de soucis.

La norme de sécurité RTCA DO-311A de l'EASA porte sur la certification des batteries qui alimentent des systèmes ou équipements dans les avions. Toutefois, cette norme doit être adaptée et étendue à l'usage des batteries pour alimenter des systèmes majeurs comme les systèmes de production de l'appareil. Les eVTOL ne pourront pas voler sans les batteries pour fournir l'énergie nécessaire.

Pour répondre à ce besoin, l'EASA travaille actuellement sur une condition spéciale (SC E-19) pour les systèmes de propulsions hybrides et électriques (EHPS). Elle a fait une proposition de ce document en janvier 2020. La version finale de la SC E-19 a été publiée le 7 avril 2021. Le document porte sur les exigences de l'EASA pour la certification de systèmes de propulsions hybrides ou électriques.

D'ailleurs, lors de la phase de consultation par les industriels, Boeing a émis la question suivante : « What is the link between EHPS-SC and VTOL-SC? »¹³. L'EASA y répond en affirmant qu'il n'y a aucun lien entre les deux conditions spéciales. Mais que tout constructeur qui souhaite concevoir un VTOL électrique devra certifier son appareil conformément à la SC-VTOL et son système de propulsion électrique en vertu de cette condition spéciale. (« The two are independent. The SC E-19 is a transversal SC addressing any kind of electric/hybrid propulsion system for any A/C. For example, if an applicant wishes to certify a VTOL A/C with the electric propulsion system included in the A/C-Type Design, the certification basis of the A/C would consist of at least the SC VTOL and the SC E-19 EHPS »¹⁴)

¹³ Traduction : Quel est le lien entre l'EHPS-SC et la VTOL-SC ?

¹⁴ EASA, « SC E-19 Electric / Hybrid Propulsion System – Comment response document », Avril 2021

Une alimentation électrique oblige une nouvelle architecture de véhicule qui permette de réduire l'utilisation de composants critiques et coûteux. En contrepartie, les systèmes deviennent plus complexes.

La complexité d'un système entraîne implicitement des délais plus longs dans le cadre de sa certification et son coût de production est plus important.

Les constructeurs vont donc proposer des systèmes de plus en plus redondants dans l'espoir de le rendre plus sûr et moins complexe. Or plus de redondance signifie plus de poids.

Chapitre 2 : Les batteries sont-elles suffisamment performantes pour offrir l'autonomie nécessaire aux opérations envisagées ?

L'autonomie des appareils est un facteur important pour permettre la mise en place d'une mobilité urbaine aérienne. Elle peut avoir de nombreux impacts sur l'exploitation des taxis aériens : liaisons souhaitées vs liaisons réalisables, report des coûts d'exploitation sur les passagers, fréquence des infrastructures « vertiports » ...

Aujourd'hui, les constructeurs font face à un problème majeur : l'immaturité technologique des batteries électriques pour cet usage. Ces batteries permettent de fournir une autonomie de vol moyenne de 30 minutes. Cela est relativement faible lorsqu'on la compare à la fonction des VTOL. Il faudrait que dans les années à venir, l'autonomie soit plus importante, ce qui générera des bénéfices tels que :

- La possibilité de proposer des trajets sur de plus grandes distances ;
- La réduction des coûts d'exploitation des aéronefs grâce à une fréquence de recharge des batteries plus faible et/ou un poids de l'appareil réduit.

Concrètement, si l'on considère que les phases de décollage et d'atterrissage prennent à elles deux environ 10 minutes, il ne reste que 20 minutes d'autonomie en vol. Les diverses procédures opérationnelles des régulateurs obligeront probablement à conserver un temps minimum de vol pour des raisons de sécurité (mauvaise météo, déroutement, congestion aéroportuaire...). Nous estimerons que ce temps de vol sera de 5 minutes pour ce cas (le temps sera variable en fonction de la distance à laquelle se trouveront les vertiports de dégagement), il reste alors seulement 15 minutes de vol. Sachant qu'il sera probable que la vitesse maximum des appareils ne puisse être atteinte à basse altitude, au-dessus de toutes les zones survolées, le rayon d'action des eVTOL serait finalement faible : Supposons que les aéronefs aient une vitesse moyenne de 60 miles/h (soit environ 96 km/h), cela correspondrait à une distance de 24 km en 15 minutes, soit la distance entre Orly et CDG. Ceci explique le fait que chaque batterie de eVTOL devrait être rechargée après chaque vol pour ceux opérant en centre-ville. En outre, les vols opérés en zone extra-urbaine seront limités à desservir des territoires limitrophes.

Pour proposer un rayon d'action accru, les constructeurs pourraient tout simplement doubler le nombre de batteries à bord de l'appareil. Or, ce n'est pas si simple que ça. Ils se heurteront à un autre problème non négligeable dans le transport aérien : Le poids de l'aéronef. En effet, plus l'appareil sera lourd, plus il consommera et plus ses coûts d'exploitation seront importants pour l'opérateur. De plus, les eVTOL sont classifiés selon leur poids et leur nombre de sièges offerts. De fait, en augmentant le poids de l'appareil, la société pourrait prendre le risque de ne plus pouvoir faire partie de la catégorie eVTOL et le but n'est pas celui-ci. Elle prendrait le risque d'appartenir à la classe d'appareil supérieur (avion léger ou hélicoptère) et devrait répondre à des exigences de certification plus complexes.

L'EASA a défini que la masse maximum au décollage ne doit pas dépasser 3 175 kg (7 000 lbs) et le nombre maximum de sièges passagers offerts ne peut dépasser neuf.¹⁵

Si l'on étudie la batterie EcoPulse (dont la fiche se trouve en annexe, à la figure 9) qui équipera l'eVTOL CityAirbus, on peut observer qu'augmenter le nombre de systèmes de stockage et d'alimentation du moteur représenterait une part importante du poids de l'appareil. Développée par Airbus, en partenariat avec Daher et Safran, la batterie pèse 350 kg, soit plus de 10% de la masse maximum au décollage définie par l'EASA. Le constructeur européen ne peut donc pas se permettre de doubler le nombre de systèmes.¹⁶

En outre, si l'on compare l'aviation à l'industrie automobile. La Tesla model S dispose d'une autonomie d'environ 600 km lorsque la batterie est rechargée intégralement. La question se pose de la puissance nécessaire lors des différentes phases du vol. Sur un trajet, la voiture devra trouver une source d'énergie supérieure lorsqu'elle accélérera sur l'autoroute, besoin auquel

¹⁵ Document n° SC-VTOL-01, « Special Condition Vertical Take-Off and Landing (VTOL) Aircraft », EASA, Juillet 2019

¹⁶ Airbus, « Airbus high-voltage battery technology prepares for Ecopulse flight test and beyond », Mars 2022
Disponible sur : <https://www.airbus.com/en/newsroom/news/2022-03-airbus-high-voltage-battery-technology-prepares-for-ecopulse-flight-test>

nous savons répondre. En revanche l'aéronef devra alimenter plusieurs moteurs pour faire tourner tous les rotors et être capable d'élever un appareil de 3 tonnes.

C'est grâce au développement récent des batteries à haute tension que l'industrie des eVTOL a pu s'étendre ces dernières années. Ces nouveaux groupes électriques sont plus performants et répondent progressivement aux besoins. Le vol vertical est un processus à forte consommation d'énergie, qui nécessite une batterie avec une densité d'énergie élevée, et, implicitement, un poids important. C'est là que se trouve un des enjeux majeurs de cette course à la mobilité urbaine aérienne pour les fabricants.

Aussi, des batteries plus grandes fournissent l'énergie nécessaire pour augmenter la portée d'un appareil, mais ce poids supplémentaire nécessite plus de propulsion pour rester en l'air, nécessitant des batteries encore plus grandes.

Pour l'instant, les constructeurs tentent de trouver le meilleur rapport charge utile - performance de l'eVTOL.

Une grande partie des progrès proviendra de l'évolution de la technologie des batteries de voitures électriques, selon Dirk Hoke, à la direction de Volocopter. Au fur et à mesure que les technologies s'amélioreront, les capacités des eVTOL vont augmenter. Les progrès relatifs au rapport poids-puissance des batteries donneront les plus grandes augmentations de performances de ces aéronefs. D'autres améliorations telles que l'efficacité aérodynamique apporteront quelques gains, mais leur ampleur sera bien moindre.

Titre 3 : Une avionique de pointe

Dans cette section, nous verrons deux innovations majeures en matière d'avionique : les systèmes de commande de vol autonome et les systèmes de communication.

Les constructeurs proposent presque tous des aéronefs capables d'évoluer sans pilote(s) à bord. En revanche, des questions demeurent quant à l'acceptabilité des usagers à monter à bord d'un appareil sans pilote(s) et à la réglementation de ce type d'opération. C'est pourquoi la plupart des constructeurs comme Volocopter, Airbus, Autoflight ou Joby proposent une version pilotée de leurs aéronefs dans l'attente de la démocratisation des vols autonomes.

Seuls Boeing (en partenariat avec Wisk Aero) et Ehang visent la certification de leur appareil sans prétendre à une version avec pilote à bord.

Si l'on prévoit que les aéronefs volent de façon autonome, il va de soi que les systèmes de communication entre les appareils et avec les infrastructures au sol devront répondre aux besoins de l'opérabilité des aéronefs. Les appareils devront communiquer entre eux pour savoir où ils se trouvent par rapport aux autres, et les opérateurs devront être en mesure de reprendre la main à distance aisément en cas d'anomalie. C'est pourquoi la communication doit être fiable et fluide.

Toulouse, capitale mondiale de l'aéronautique avec plus de 600 entreprises de la filière aéronautique, souhaite également se positionner et démontrer ses compétences dans le développement d'une mobilité alternative. La ville souhaite être la vitrine de l'aviation de demain. Pour cela, l'agglomération met en œuvre des projets comme VILAGIL, un projet visant à développer un modèle de mobilité qui s'appuie sur la mobilité urbaine aérienne, l'intelligence artificielle et les données. Il s'agit là d'apporter des solutions opérationnelles et pérennes de

mobilité urbaine¹⁷ pour répondre à la demande croissante de l'offre de transport de la ville. La ville est marquée par un étalement urbain prononcé et voit sa population croître fortement (environ +1%/an)¹⁸. C'est pourquoi, d'ici 2025, elle veut pouvoir proposer 500 000 places quotidiennes supplémentaires à bord de ses transports en commun. Ces projections mènent à la congestion des réseaux routiers de la métropole si aucune solution n'est trouvée. Il est impératif de fluidifier les déplacements sur son territoire.

La ville de Toulouse, et particulièrement l'aéroport de Toulouse-Francazal va en quelque sorte devenir le laboratoire des déplacements de demain. D'ici 2025, la ville souhaite que les 38 hectares de l'aérodrome deviennent un village test où seront conçues et expérimentées les mobilités du futur. La base accueille déjà des navettes sans conducteur ou encore une piste d'essai d'Hyperloop (train futuriste supersonique). À terme, les aménagements du site permettront la création de pistes d'essais pour tester des véhicules autonomes connectés, des voitures volantes, des drones... L'objectif étant de pouvoir accroître leurs performances. En outre, la ville voudrait également qu'un centre de recherche, d'essais et d'innovation consacré à l'hydrogène soit mis en place d'ici 2024. Ce centre regroupera de nombreux acteurs de l'industrie pour permettre la production et le développement d'énergie propre appliquée aux transports et aux avions verts. Tous les acteurs de demain seront réunis en un même endroit, serait-ce l'occasion de développer des VTOL ayant une source d'énergie autre que l'électricité ?

Aerospace Valley est un pôle de compétitivité européen spécialisé dans l'industrie aéronautique et spatiale. Le groupe toulousain compte 861 membres, dont 614 PME. Il s'est engagé dans le projet VILAGIL de la ville pour participer au développement de la mobilité urbaine aérienne et partager son expertise. Le groupe s'appuie sur cette expérience et cette mise en pratique pour participer au projet européen TindAIR (mené sous l'égide du programme SESAR). Ce projet vise

¹⁷ Territoire d'innovation, « VILAGIL »

Disponible sur : <https://www.banquedesterritoires.fr/sites/default/files/2020-11/Toulouse%2C%20Vilagil%20%28Occitanie%29.pdf>

¹⁸ Populastat

Disponible sur : <https://populationstat.com/france/toulouse>

à travailler sur des scénarios opérationnels en zone urbaine pour « répondre à des besoins comme le transport médical, de passagers ou de fret ».¹⁹

¹⁹ A. RIMOKH, (Directeur délégué drones et nouveaux usages au sein d'Aerospace Valley), aviation civile Le magazine de la Direction Générale de l'Aviation Civile n°393, page 21, Octobre 2021

Chapitre 1 : Les systèmes de commande de vol autonome

Il a déjà été testé et démontré que les vols sans pilote sont possibles dans l'aviation commerciale. Airbus a par exemple fait un vol totalement autonome avec l'A350 en 2020. Le programme de recherche d'Airbus « UpNext » est un programme d'intelligence artificielle qui s'appuie sur des images à 360° prises à l'aide de caméra sur l'avion. Après avoir été paramétré pendant près de 500 vols, le système a permis d'effectuer l'intégralité des manœuvres (roulage, décollage, croisière et atterrissage) de façon autonome. Inspiré de cette technologie, les constructeurs l'ont adaptée pour les eVTOL.

Il existe cinq niveaux d'autonomie²⁰ :

- Niveau 1 : Le pilote a les commandes et reçoit une assistance des systèmes électroniques (trajectoire, stabilité de l'avion, etc.).
- Niveau 2 : Le système s'occupe de tout dans certaines phases de vol (croisière en aviation commerciale principalement), le pilote surveille et reprend la main en cas de problème.
- Niveau 3 : Le système s'occupe de tout, et surveille également les éventuels obstacles sur la trajectoire de l'avion. Le pilote n'intervient qu'en cas de problème.
- Niveau 4 : Le système s'occupe de tout, même dans certaines situations problématiques.
- Niveau 5 : le système s'occupe de tout, quelle que soit la situation.

Pour pouvoir atteindre le niveau 5 d'autonomie, l'avion doit disposer de nombreux systèmes électroniques comme des capteurs de données, des caméras et scanners, des systèmes de navigation à inertie (capteurs d'accélération et de rotation), des systèmes de positionnement par satellite GNSS...

²⁰ Organisation Internationale des Constructeurs Automobiles (OICA)

Vous trouverez en annexe (figure 10), une image du système de détection et d'évitement de collision développé par Thales

Tous ces systèmes permettront à l'appareil de connaître sa position exacte dans le ciel, sa direction, sa vitesse, l'environnement fixe et mobile autour de lui, etc.

Toutes les données seront ensuite traitées et transformées en information pour que l'avion prenne les meilleures décisions dans une situation donnée pour garantir la sécurité du vol.

La technologie de la conduite autonome se développe également dans l'automobile et les recherches sont partagées entre les deux industries. Cependant, les contraintes en vol et sur la route ne sont pas les mêmes (pas de piétons dans le ciel mais des pigeons à la place), les constructeurs doivent alors prendre en considération le maximum d'éléments et d'aléas pouvant survenir dans la conception de vols totalement autonomes.

Nous pouvons retenir que les deux systèmes sont complexes à paramétrer. En France, environ 400 piétons sont tués chaque année sur les routes²¹ tandis que 10 000 collisions aviaires ont lieu chaque année en Amérique d'après la FAA.²²

Des questions restent toutefois en suspens quant au pilotage autonome des appareils. Nous avons vu précédemment qu'il existe plusieurs niveaux d'autonomie et que presque tous les aéronefs conçus en 2022 disposent d'un pilote autonome. En revanche, dans quelle mesure des vols autonomes pourront-ils être déployés ? La certification de ces systèmes doit être définie. Les constructeurs devront proposer des procédures pour les vols mono-pilote et sans pilote, qui seront soumises à validation lors de la certification.

²¹ Observatoire National Interministériel de la Sécurité Routière (ONISR)

²² Airport Lifestyle, « Bird strikes: How common are they? »

Disponible sur : <https://airportlifestyle.com/bird-strikes/#:~:text=According%20to%20the%20Federal%20Aviation,bird%20strikes%20becoming%20more%20common%3F>

Cette technologie repose également sur l'intelligence artificielle (IA). L'EASA traite ce sujet avec sérieux et rédige des orientations²³ pour son usage en aviation. En effet, l'intelligence artificielle pourrait permettre de prendre des décisions plus adéquates dans certaines citations, voire être plus sûr que l'Homme, l'erreur humaine (première cause d'accident²⁴) étant exclue. Toutefois, selon les compétences de ce système, les conséquences peuvent être relativement importantes.

Récemment, un test simulé par l'armée américaine a mis en évidence la position de l'Homme vis-à-vis de l'IA. Le drone, contrôlé par l'IA à dans un premier temps, supprimer l'humain qui lui donnait l'ordre de ne plus effectuer sa mission. L'IA a donc été reprogrammé avec la consigne de ne pas tuer l'opérateur humain. Lors du deuxième essai, le drone a détruit les systèmes de communication américains utilisés par l'opérateur pour ne plus recevoir d'ordre et pouvoir mener sa mission à bien.

L'emploi de l'IA dans la mobilité aérienne urbaine n'aura jamais les mêmes incidences que dans l'armée mais que se passera-t-il si le logiciel prend des décisions inappropriées mettant en danger la sécurité des passagers ?

Avant de pouvoir mettre en service des aéronefs autonomes, les constructeurs et opérateurs pourraient expérimenter ensemble cette technologie en créant des systèmes d'aide et de contrôle de plus en plus présents à bord. Par exemple, des fonctions de contrôle de vols avancées, ainsi que des ordinateurs pourraient équiper les eVTOL pour aider les pilotes dans leur mission et faciliter le pilotage des appareils. Les pilotes superviseraient alors les vols dans l'attente de l'accord des autorités régulatrices.

Des pilotes expérimentés apprendront à piloter ces appareils dans un premier temps. Puis, une licence spécifique, propre aux eVTOL devrait voir le jour dans les prochaines années pour former les futurs pilotes.

²³ EASA, « Artificial intelligence roadmap 2.0, Human-centric approach to AI in aviation », Mai 2023

²⁴ O. Monod, « Crash avion, pour en finir avec l'erreur humaine », *L'Express*, 2015

Disponible sur : https://www.lexpress.fr/actualite/societe/fait-divers/crash-d-avion-pour-en-finir-avec-l-erreur-humaine_1664391.html

Ce n'est que d'ici plusieurs années que les pilotes retrouveront le sol pour superviser plusieurs vols en même temps. Lorsqu'il n'y aura plus de pilote à bord des eVTOL, la réglementation obligera les opérateurs à être en mesure de reprendre le contrôle de l'aéronef à distance en cas d'urgence. C'est pourquoi des personnes qualifiées surveilleront les vols depuis le sol.

L'EASA estime pouvoir finaliser la réglementation avant 2030, les parties-prenantes du secteur pensent pouvoir certifier leurs premiers systèmes à partir de 2025 et effectuer des vols autonomes d'ici 2050. En annexe (figure 11) se trouve le calendrier envisagé par l'EASA.

La question des zones blanches se pose, doit-on interdire l'opérateur de voler dans des espaces où il ne pourra pas reprendre le contrôle de l'appareil durant un certain laps de temps à cause du réseau ?

Chapitre 2 : Les systèmes de communication

Les industriels comptent sur le développement de la 5G pour proposer un système de communication optimal. En effet, les communications par satellite ont l'avantage de couvrir l'ensemble du globe terrestre, y compris les territoires les plus reculés. Mais des problèmes de vitesse et de bande-passante (quantité d'informations pouvant être transmises simultanément sur une voie de transmission, et s'exprime en bits/seconde²⁵) se posent.

Le réseau internet haute vitesse permettra des échanges de données volumineux (image haute définition par exemple) entre les véhicules autonomes et les centres de contrôle ou toute autre infrastructure en temps quasi-réel. Plus encore, les aéronefs seront interconnectés par ce même réseau et communiqueraient entre eux.

Parmi les informations échangées, on retrouvera les données météorologiques, les données de vol, le trafic aérien, la surveillance de la maintenance en temps réel, les services au passager comme le wifi, une connexion avec les applications de commande (comme Uber), etc.

Concrètement, la 5G permet des débits allant de 128 à 321 Mbits/seconde (regarder une vidéo en direct sur internet nécessitant 6 Mbits/seconde) et un délai de transmission de l'information d'une milliseconde. Cela signifie que toutes les données pourraient être transmises en moins d'une seconde aux autres appareils et à l'opérateur.

En revanche, l'usage de la 5G et d'internet généralement dans le cadre des systèmes de vol des appareils soulève quelques problèmes majeurs. La cybersécurité va devenir un des enjeux majeurs pour les constructeurs pour être en mesure de répondre aux exigences de sécurité. La Commission européenne a publié deux règlements²⁶ d'exécution pour établir des règles pour

²⁵ « Bande passante : définition, traduction et acteurs », Journal du Net, Janvier 2019

Disponible sur : <https://www.journaldunet.fr/web-tech/dictionnaire-du-webmastering/1203431-bande-passante-definition-traduction-et-acteurs/>

²⁶ Règlement délégué 2022/1645 de la commission du 14 juillet 2022 et Règlement d'exécution 2023/203 de la commission du 27 octobre 2022

l'identification et la gestion des risques pour la sécurité de l'information dans les organisations aéronautiques. La partie IS introduit des exigences pour l'identification et la gestion des risques pour la sécurité de l'information. Le cadre réglementaire ouvrant la voie à un système aéronautique cyber-résilient est rédigé.

Dès lors qu'un système est connecté via un réseau sans fil (wifi, Bluetooth, 5G...), il est propice à une intrusion externe et donc, à un piratage.

Si l'on étudie de plus près les voitures autonomes, des informaticiens ont démontré des failles à plusieurs reprises dans les systèmes informatiques. Ils ont par exemple été capables de prendre le contrôle de la radio et de la climatisation. Plus grave encore, ils ont prouvé qu'ils pouvaient prendre le contrôle de la pédale de frein et du volant, à distance.

En 2021, lors du concours de hacking Pwn2Own qui se tient chaque année durant la conférence sur la sécurité informatique CanSecWest, deux chercheurs en sécurité ont présenté la façon dont ils ont pris le contrôle d'une Tesla à l'aide d'un drone. Équiper le drone d'un dongle WIFI leur a permis de pénétrer dans les systèmes informatiques du véhicule, via une faille dans le programme d'auto-divertissement. En moins de trois minutes, ils ont pu déverrouiller et ouvrir les portes du véhicule. L'attaque leur permettrait également de changer la position des sièges, les réglages de direction et d'accélération. Cela pourrait aussi leur laisser installer un logiciel qui servirait de point d'accès pour pirater d'autres véhicules à proximité. Ce piratage depuis un drone leur permet d'attaquer un véhicule à environ 100 mètres de distance. De plus, cela leur permet de pirater plusieurs véhicules en même temps, sur un parking par exemple. Tesla a aujourd'hui résolu ces failles.

Cet exemple justifie l'importance de la protection contre les cyberattaques. Les constructeurs aéronautiques souhaitent profiter des innovations dans la conception de leurs aéronefs mais ils ne doivent pas oublier que tous les systèmes pourraient ouvrir des failles.

Entre 2000 et 2020, pas moins de 26 attaques informatiques ont visé le transport aérien. En 2015, la compagnie aérienne LOT Polish Airlines s'est fait pirater. Les hackers ont bloqué la possibilité d'envoi des plans de vol à l'avion dans le cadre de la préparation du vol. Que se serait-il passé si de faux documents avaient été envoyés à l'équipage ?

Proposer le WIFI à bord, un système de communication via la 5G ou le système de vol autonome laisse des portes ouvertes aux hackers s'ils sont mal configurés par les fabricants.

C'est pourquoi les acteurs du transport aérien traitent avec sérieux la cybersécurité. Dès 2019, lors de la 40^{ème} session de l'assemblée, l'OACI a d'ailleurs pris la décision de créer un programme pour la cybersécurité.

En Europe, l'EASA réalise de nombreuses recherches, notamment par le biais de colloques, sur la cybersécurité, afin d'établir un cadre réglementaire et des directives pour les professionnels. En 2017, l'European Centre for Cybersecurity in Aviation²⁷ (ECCSA) a été fondé par 12 membres : Airbus, Air France/KLM, Brussels airport, l'autorité pour l'aviation civile polonaise, ENAV S.p.A., EUROCONTROL, Finnair, Frankfurt airport, Leonardo S.p.A., Lufthansa Group, NAV Portugal et Thales. Ce centre a pour but de lutter contre les cyberattaques grâce à une approche collaborative entre les acteurs de l'industrie. Ils réalisent des réunions, partagent des informations, font des exercices...

²⁷ Centre européen pour la Cybersécurité en aviation

Pour conclure, l'architecture des eVTOL est nouvelle. La production de ces appareils fait appel à de nombreuses innovations qui ne sont pas encore certifiées. Leur certification soulève de nombreux défis pour les constructeurs mais aussi pour les régulateurs.

Les constructeurs présentent des appareils innovants qui doivent répondre aux exigences réglementaires applicables. La sécurité est un des critères numéro un des régulateurs. Si l'on prend l'exemple d'une panne dans la conception d'un aéronef :

Le constructeur va proposer de pallier une panne d'hélice ou de rotor grâce à la redondance du nombre. Cela lui permet de considérer que l'on peut continuer le vol en toute sécurité ou aller se poser du moment qu'un nombre défini par le constructeur de rotors fonctionne encore, en dimension appropriée. C'est une solution simple et peu coûteuse pour lui. Si l'aéronef se compose de huit rotors et que le constructeur affirme que l'aéronef est en mesure d'opérer ses vols en utilisant cinq rotors, alors la panne d'un, deux voire trois rotors ne remettra pas en cause la faisabilité du vol.

Cependant, les constructeurs doivent tenir compte des conséquences d'une défaillance. Supposons que la panne d'un rotor entraîne la libération de débris et endommage un ou plusieurs autres rotors, l'aéronef ne pourra alors peut-être plus être en mesure de se poser en toute sécurité. Cette même question pourrait se poser dans le cas d'une collision aviaire avec un groupe d'oiseaux où plusieurs rotors seraient endommagés. Les constructeurs doivent donc chercher à proposer une structure d'aéronef qui saurait répondre à ce type d'incident et former les équipages à ce type de panne, comme cela se fait en aviation commerciale.

Les constructeurs doivent donc tenir compte de toutes les pannes potentielles qui pourraient donner lieu à une défaillance catastrophique.

Le processus de certification des aéronefs est un support majeur pour s'assurer que les aéronefs répondent à ces attentes sécuritaires.

Partie 2 : La réglementation est-elle adaptée pour permettre le développement des taxis volants ?

Au regard de la rapidité des avancées technologiques et de la demande croissante portée aux eVTOL, les autorités compétentes se doivent de faire des propositions dans des délais restreints afin de ne pas être un frein et permettre de nouveaux aménagements territoriaux. Les obstacles réglementaires doivent être surmontés avant le déploiement des eVTOL dans nos villes. La France, ayant la volonté d'opérer des vols durant les Jeux olympiques de 2024, il faudrait que la réglementation soit établie avant l'année prochaine.

Chronologiquement, plusieurs acteurs participent pour qu'une personne puisse prendre l'avion. De la conception à l'exploitation aérienne, nous retrouvons le constructeur et l'exploitant principalement. Aujourd'hui, les deux organismes qui délivrent les certificats les plus fiables, car ce sont les plus exigeants, sont l'EASA et la FAA. Tous deux démontrent un niveau de confiance élevé et leurs certificats et agréments sont les plus compliqués à obtenir. Leur obtention reste similaire pour les deux organismes et un accord bilatéral américano-européen existe. C'est pourquoi, dans cette partie, nous verrons ce qui se fait en Europe et aux Etats-Unis.

Pour le constructeur, il existe plusieurs agréments lui permettant de produire un aéronef :

- L'agrément d'Organisme de Conception (DOA) ;
- L'agrément de production ;
- L'agrément de réparation ;
- Diverses normes de qualité de type ISO.

Le processus de formation des équipages, notamment la qualification de type sur la machine est proposé par le constructeur. Celui-ci doit alors le fournir à des organismes de formation agréés (ATO).

Une fois les agréments obtenus, l'industriel peut concevoir un aéronef, et par la suite, le produire à grande échelle. Pour cela, l'appareil doit être certifié par les autorités compétentes. Toutes les pièces doivent être testées et certifiées une par une, du plus petit écrou au fuselage. Le moteur est également soumis à une certification. Enfin, l'aéronef dans son entièreté doit subir une batterie de tests en soufflerie, en simulateur, au sol puis en vol.

Une fois le certificat de type pour l'aéronef obtenu, sa commercialisation peut commencer. C'est alors au tour des exploitants de justifier leurs compétences devant les autorités. Pour commencer à exploiter un aéronef commercialement, ils doivent être titulaires d'un certificat de transporteur aérien et d'une licence d'exploitation.

Les entités juridiques s'inspirent de la réglementation en vigueur pour l'aviation commerciale « traditionnelle » pour rédiger les normes qui s'appliqueront aux eVTOL. Il convient de conserver un haut niveau de sécurité, principe clé de l'aviation aujourd'hui. Toutefois, il est primordial de modifier la réglementation pour l'adapter aux eVTOL, aéronefs dont les technologies et l'exploitation sont différentes. Celle-ci doit notamment tenir compte des nouvelles sources d'énergie et des systèmes de navigation autonome (sans pilote à bord). Ces dernières années, les professionnels de l'industrie ont fait face à des défis similaires avec les drones ou UAS. Ils peuvent s'inspirer des textes d'ores-et-déjà rédigés concernant l'absence de pilote à bord d'un aéronef par exemple.

Les professionnels en charge de l'élaboration des textes réglementaires doivent tenir compte de la variété des machines développées par les constructeurs (type de propulsion, type de carburant, etc.) afin de ne pas favoriser un design plutôt qu'un autre car nous ne pouvons pas savoir quel modèle sera le plus performant.

Le processus de certification doit donc être rédigé rapidement, de manière globalement équitable entre les constructeurs, sans faire de préjudice à l'innovation. Là est la complexité du travail des régulateurs.

Cette partie portera sur les nombreuses certifications citées ci-dessus pour les nouveaux constructeurs et aéronefs arrivant sur le marché afin de déterminer si la réglementation applicable est adaptée aux eVTOL.

Titre 1 : A quelles conditions doivent répondre les constructeurs ?

Jusqu'à la mise en service de l'avion, l'acteur majeur est le constructeur. Pour pouvoir développer un avion, le constructeur doit justifier sa capacité à développer et produire un aéronef. Pour en attester, les autorités compétentes, à savoir l'EASA en Europe desservent des agréments d'organisme de conception : Design Organisation Approval (DOA). Le processus d'obtention de l'agrément se trouve figure 12. Cet agrément permet au constructeur de concevoir un produit (moteur, hélice ou aéronef). Une fois obtenu, il peut certifier lui-même ce qu'il conçoit et justifier du respect des conditions de navigabilité du produit auprès des autorités. Le document de référence pour l'obtention de l'agrément est le PART21, Sous-partie J. Il reprend le processus à suivre pour l'obtention ainsi que les conditions à remplir (manuel d'exploitation, procédures pour la modification d'une pièce, etc.)

Ensuite, le constructeur doit obtenir l'agrément de production (POA) pour pouvoir le fabriquer. Les conditions d'obtention de l'agrément sont également définies dans le PART21, sous-partie G. On retrouve le détail des obligations à remplir pour l'industriel : avoir du personnel certifié, un système de qualité fiable (il existe également des certifications reconnues dans toutes les industries pour en attester, notamment ISO), des responsables désignés, etc.

Enfin, nous avons les agréments d'organisme d'entretien (MOA) pour faire la maintenance de l'appareil. Son obtention est définie dans le PART145 de l'EASA.

Pour conclure, l'obtention de ces agréments pour le constructeur ne nécessite pas particulièrement de changement, que ce soit en Europe ou aux Etats-Unis. En effet, la base pour leur obtention repose principalement sur la qualité, la rigueur et la capacité technique de l'entreprise.

Titre 2 : Quelle est la réglementation applicable pour la certification des appareils ?

Les normes pour la certification des aéronefs sont définies dans l'annexe 8 de l'OACI : Navigabilité des aéronefs. La réglementation est retranscrite plus localement par la Commission européenne ou par les États eux-mêmes.

Aujourd'hui, il y a six niveaux de tests et d'essais pour certifier un appareil. Cela commence par la certification des matériaux utilisés et termine par les essais de l'appareil entier pour délivrer le certificat de type qui atteste que l'appareil répond aux exigences de navigabilité. Ce certificat sera accompagné d'une fiche de navigabilité qui comprendra la nomenclature de l'appareil, ses limitations, etc. Un schéma des étapes nécessaires à la certification d'un appareil se trouve en annexe (figure 13)

Pour qu'un aéronef soit certifié, il suivra des phases d'essais en soufflerie et simulateurs, puis en vol. Les essais sont de plus en plus complexes : du tour de piste au test en condition météorologique extrême.

Les processus de certification et les exigences des autorités sont définis dans les textes : les FAR23 à 35 de la FAA en Amériques et les CS-22 à 31 pour l'EASA. Chaque numérotation faisant référence à une catégorie d'aéronef. Ensuite, pour l'EASA, nous avons la CS-E (norme de navigabilité des moteurs) et CS-P (hélices).

Chapitre 1 : Aux Etats-Unis

La FAA a fait le choix d'adapter la réglementation existante en matière d'aviation commerciale aux eVTOL.

En Amérique, le processus de certification pour l'obtention d'un certificat de type est défini par l'ordonnance n°8110.4C de la FAA. Pour certifier les eVTOL, la FAA s'appuie sur l'un des deux processus de certification existants dans 14 C.F.R.²⁸ Partie 21.17(a) et (b). L'extrait de ces articles se trouve en annexe 14.

La partie 21.17(a) désigne les normes de navigabilité applicables lorsque l'appareil correspond étroitement à une classe d'engin à rotor particulier, ainsi que les conditions spéciales pour remédier à toute différence.

Appliquer la partie (a) permettrait de proposer une condition spéciale (comme en Europe) définissant les critères propres aux eVTOL et de suivre le processus de certification conformément aux standards de navigabilité attendus, définis dans la partie 23 du C.F.R. 14. Pour ce faire, il faudrait que les eVTOL trouvent une ressemblance étroite avec une classe d'appareil particulière.

En parallèle, la FAA a mis à jour les normes de navigabilité prévue en partie 23 du 14 C.F.R. pour fournir une approche basée sur les performances et offrir une certaine flexibilité aux conditions spéciales telle que les eVTOL.²⁹

La partie (a) permettrait d'apporter aux entreprises plus de certitudes de certification puisque les normes actuelles s'appliqueraient. Elles seraient simplement ajustées pour les adapter aux nouveaux aéronefs.

²⁸ Le titre 14 du Code of Federal Administration contient l'ensemble des règles et règlements pour l'industrie aéronautique et spatial aux Etats-Unis. Il est rédigé et revu régulièrement par le Ministère des Transport, la FAA et d'autres instances américaines qui supervisent ces industries.

²⁹ Doc n° 83 FR 21850, « Accepted Means of Compliance; Airworthiness Standards: Normal Category Airplanes », FAA

La partie 21.17(b) s'applique pour les classes spéciales d'aéronefs. La FAA appliquera les exigences de navigabilité dérivées d'autres règlements et, le cas échéant, définit les critères qu'elle jugera nécessaires pour fournir un haut niveau de sécurité et répondre aux exigences de navigabilité existantes.

La partie (b) offrirait plus de flexibilité aux constructeurs et régulateurs dans la mesure où la FAA définirait des critères de navigabilité au cas par cas. La multitude de concepts d'eVTOL implique de nouvelles technologies diverses et propres à chaque appareil. De fait, les exigences définies en partie 23 du 14 C.F.R. ne sont pas forcément adaptées. De plus, l'évolution et les concepts futurs comme l'automatisation ou les propulsions électriques obligeront de revoir la certification de type dans les prochaines années.

Cette partie permettrait donc de traiter toutes les innovations individuellement. Par le biais de documents de fond fournis par les constructeurs (comprenant la description détaillée des systèmes, leur fonctionnement et leur connexion avec les autres systèmes), la FAA pourrait élaborer les normes requises.

La FAA travaille depuis plus d'un an sur la partie 21.17. Elle cherche à déterminer s'il est plus judicieux d'appliquer la partie 21.17(a) ou la partie 21.17(b). Il semblerait qu'elle ait pris sa décision mi-2022.

En effet, fin 2022, la FAA a publié ses critères de navigabilité pour l'eVTOL JAS4-1 conçu par Joby Aviation. C'est le premier aperçu détaillé de la base de certification des eVTOL. Ce document a été publié six mois après que la FAA ait changé de cap sur la certification des aéronefs de ce type.

En mai 2020, Joby Aviation avait obtenu une base de certification pour les avions à voilure fixe. Or, deux ans plus tard, la FAA a plutôt décidé de certifier les eVTOL en tant que classe spéciale d'aéronefs de transport motorisé en vertu de la partie 21.17(b).

L'eVTOL de Joby Aviation devrait être certifié au plus tard en 2025. La certification est basée sur les parties 23, 33 et 35 du 14 C.F.R. et comprend de nouveaux critères. Parmi les nouveaux critères, nous pouvons par exemple citer les exigences spécifiques de protection contre l'incendie des combustibles liquides qui sont remplacés par les menaces liées aux centrales électriques.

Compte tenu des exigences variables en fonction du type d'aéronef, les décisions de la FAA concernant la certification des aéronefs de type eVTOL seront essentielles pour déterminer l'applicabilité de règles spécifiques à de futures questions réglementaires telles que les opérations, les pilotes et les infrastructures.

Chapitre 2 : En Europe

La CS-23 correspond aux aéronefs dits normaux. C'est-à-dire qu'ils disposent de moins de neuf sièges (sans compter celui du pilote), et une masse maximale au décollage inférieure à 5670 kg. Les eVTOL ont généralement les caractéristiques pour entrer dans le cadre de la norme CS-23. Elle peut donc servir de support pour les constructeurs le temps que les régulateurs rédigent les règlements finaux pour les eVTOL. La norme CS-23 traite :

- Des éléments de vol : performance du vol, maniabilité, stabilité, mouvements au sol, limitations opérationnelles... ;
- De la structure : surfaces, ailerons, système de chargement d'eau, réaction de la structure dans différentes phases de vol et notamment lors d'une procédure d'atterrissage d'urgence, usure de la structure ... ;
- Des conditions de design et de construction : contrôle des agréments et autres ;
- Des systèmes d'alimentation : moteurs, systèmes électriques, systèmes carburant et composants, système d'huile... ;
- Des équipements : pour l'éclairage, de sécurité ...
- Des tests faits et du processus d'obtention de la certification.

Toutefois, certains concepts d'eVTOL ressemblent plus à un giravion plutôt qu'un avion. Pour eux, ce serait donc la norme CS-27 qui s'appliquerait. L'EASA a donc pris la décision de rédiger une condition spéciale propre aux eVTOL. Cette décision a été motivée par le souhait de l'organisme de traiter tous les constructeurs d'égal à égal, car la norme CS-27 est plus restrictive que la CS-23 et de ne favoriser aucune configuration. La distinction des eVTOL vis-à-vis des avions conventionnels repose sur la capacité des appareils à décoller et atterrir verticalement, tandis qu'elle repose sur l'utilisation de la propulsion distribuée (en particulier lorsque plus de deux unités de portance/poussée sont utilisées pour assurer la portance lors du décollage ou de l'atterrissage vertical) par rapport aux giravions.

Le but de la condition spéciale étant de proposer un nouvel ensemble de règles, incorporant les règlements existants dans la mesure du possible.

Les constructeurs peuvent donc s'appuyer sur la condition spéciale eVTOL (SC-VTOL 01) publiée par l'EASA en juillet 2019. Depuis quatre ans, de nombreuses discussions tournent autour de ce document et quelques propositions de moyens de conformité sont publiés. Ces documents, destinés aux fabricants et aux investisseurs, visent à clarifier les normes de navigabilité pour la délivrance des certificats de type eVTOL et sur la façon dont l'EASA abordera les caractéristiques uniques de ces aéronefs.

Ce document concerne la certification des VTOL prévus pour le transport de passagers. Elle aborde des sujets propres à la certification en donnant une ébauche des conditions auxquelles devront répondre les constructeurs. Parmi les sujets, nous retrouvons les conditions en vol de l'aéronef, sa structure, le design et la construction des différents systèmes, les équipements ou encore interface du cockpit. Le document a été rédigé en s'appuyant sur les normes CS-23 et CS-27 de l'EASA, harmonisé avec la partie FAR23 de la FAA et des éléments nouveaux ont été ajoutés lorsque les régulateurs l'ont jugé nécessaire.

Le document SC-VTOL et les différents moyens de conformité qui ont suivi résultent d'un travail collaboratif entre les constructeurs, les futurs opérateurs et les régulateurs. A chaque publication, les industriels peuvent émettre des commentaires pour modifier le règlement et l'adapter à leurs concepts. Ensuite, l'EASA étudie les commentaires et donne un avis favorable ou non pour modifier le SC-VTOL. C'est alors que le document est modifié ou non.

Au fur et à mesure, les conditions d'obtention du certificat de navigabilité sont complétées. Si l'on regarde la partie VTOL.2115 portant sur les performances au décollage. Nous pouvons voir que lors de la première publication du SC-VTOL, il était seulement précisé que les constructeurs

devront fournir les performances au décollage de l'aéronef en tenant compte de l'enveloppe de vol, des obstacles environnants et d'une marge de sécurité.

Dans le dernier document (MOC 2 - SC-VTOL - Issue 3) paru en décembre 2022, cette partie aborde 19 points différents et fait 11 pages. Il a été apporté des procédures précises quant au décollage de ces nouveaux appareils (angle, vitesse, marge de sécurité, etc.). Procédures que devront respecter les constructeurs et opérateurs dans le cadre de la conception et l'exploitation des eVTOL. De plus, l'EASA demande diverses informations sur l'aéronef comme son diamètre en configuration pour le décollage.

Les constructeurs peuvent donc principalement s'appuyer sur ce document tout en ayant une marge de négociation via les commentaires s'ils sortent des normes définies par l'EASA. La rédaction d'un nouveau règlement par l'EASA offre la flexibilité nécessaire pour certifier les conceptions et les nouvelles technologies de pointe. Sur le plan opérationnel, cette condition spéciale pourra également être considérée et adaptée sans tenir compte de la réglementation pour les opérations des avions ou des hélicoptères.

De plus, conformément au document WI.CERT.00146-001 approuvé par l'EASA en juin 2020, portant sur la rédaction et la gestion des CRI (Certification Review Item ou Élément d'examen de certification) et des CAI (Certification Action Item ou Élément d'action de certification), l'EASA peut s'appuyer sur ces CRI. Les CRI sont un moyen administratif formel pour l'EASA d'enregistrer les sujets de certification et les interprétations tout au long d'un projet de certification.

À terme, les régulateurs souhaitent que la condition spéciale soit compatible avec une capacité de pilotage à distance ou différents niveaux d'autonomie. Cependant, ces aspects ne sont pas actuellement abordés. Les références liées à l'autonomie des appareils seront considérées lorsque l'usage d'aéronefs autonomes pourra être envisagé.

Actuellement, la condition spéciale de l'EASA prévoit deux catégories de certification (*Basic* et *Enhanced*) liées aux types d'opérations envisagées. Les prérequis de certification seront donc proportionnels au niveau de risque des activités. Comme pour la FAA, la sécurité reste la principale préoccupation de l'EASA. Avec cette condition spéciale, l'organisme européen cherche à s'assurer que toutes les conceptions d'eVTOL atteignent un niveau de sécurité comparable.

Pour l'AESA, les niveaux de complexité des systèmes introduits par la propulsion distribuée et les commandes de vol avancées correspondantes sont jugés suffisamment inhabituels et nouveaux pour que les moyens de conformité acceptables actuels du CS-23 ne soient plus considérés comme appropriés pour déterminer les objectifs de sécurité de l'aéronef et du système.

Les aéronefs proposés dans le cadre de la mobilité aérienne urbaine et notamment du transport de passager correspondent au risque opérationnel le plus élevé vis-à-vis des tiers et/ou du transport de passagers contre rémunération. Dans le cadre de leur certification, les régulateurs devront s'assurer de la protection des passagers et des tiers à la surface lors du survol de zones encombrées et lors du transport aérien commercial de passagers, quel que soit le nombre de passagers. Ils appartiendront donc à la catégorie *Enhanced*, catégorie dont les objectifs de sécurité des systèmes sont les plus exigeants. Les niveaux de sécurité attendus se trouvent en figure 15.

Pour la catégorie de base, les objectifs de sécurité sont liés au nombre maximal de sièges passagers, ce qui est similaire à l'approche du CS-23. En revanche, les objectifs de sécurité ont été revus à la hausse, notamment en raison de la plus grande dépendance vis-à-vis des systèmes associés à la propulsion distribuée.

Dès lors que la sécurité est assurée dans le cadre de la certification des aéronefs, les règles opérationnelles peuvent alors être construites sur des niveaux de sécurité des aéronefs démontrés et adaptés si nécessaire aux particularités locales.

Les aéronefs VTOL qui seront certifiés dans la catégorie *Enhanced* devront par exemple satisfaire aux exigences de poursuite du vol et d'atterrissage en toute sécurité, et être en mesure de continuer vers la destination initiale prévue ou un autre vertiport approprié après une panne.

Alors que pour la catégorie de base, seules les exigences d'atterrissage d'urgence contrôlé devront être satisfaites.

D'autres exigences ont également été prévues. Nous pouvons par exemple citer :

- La redondance des différents systèmes pour ne pas être face à un événement catastrophique dont la cause vient d'une défaillance unique ;
- La prise en compte du risque aviaire. Le nombre d'impact avec des oiseaux a augmenté ces dernières années. C'est pourquoi l'EASA a pris des dispositions pour les aéronefs de la catégorie Basic avec 7 passagers ou plus et pour les aéronefs de la catégorie *Enhanced* ;
- La demande de l'EASA que les constructeurs équipent les aéronefs d'enregistreur de vol. Cette demande résulte de recommandations de sécurité rédigées par plusieurs autorités d'enquête dont le NTSB qui souhaitent améliorer la sécurité des transports et faciliter les enquêtes en cas d'événements ou d'accidents. Ceci permettra de proposer des actions correctives plus rapidement. Enfin, cette décision a été prise conformément aux nouvelles normes prévues par l'annexe 6 de l'OACI qui exigent l'emport d'enregistreurs de vol légers pour les avions légers et les hélicoptères légers.

Nous n'en avons pas encore parlé mais le processus de certification des aéronefs devra tenir compte de l'environnement dans lequel vont évoluer les appareils. Il faut garder à l'esprit qu'ils pourront décoller au milieu d'immeubles. L'aéronef devra suivre une batterie de tests pour contrôler sa capacité à atterrir dans des conditions particulières, notamment en cas de défaillance critique (incendie, rotor en panne, etc.) et ce, dans différentes conditions.

Titre 3 : L'opérateur devra-t-il prendre des dispositions particulières ?

Pour finir, l'exploitant doit détenir deux documents pour exercer une activité aérienne commerciale :

1. La licence d'exploitation attestant de la capacité financière de l'entreprise ;
2. Le certificat de transporteur aérien. Ce document atteste de la capacité technique du transporteur à faire des vols, notamment en matière de sécurité des vols.

Les conditions d'obtention du certificat de transporteur aérien ne devraient pas être modifiées puisque les régulateurs considèrent qu'elles sont adaptées aux types d'aéronefs et eVTOL existants.

Les exploitants sont classés dans des sous-parties selon leur activité :

Avions :

A5 : Exploitants opérant une flotte particulièrement importante

A4 : Exploitants complexes d'avions selon un programme régulier

A3 : Autres exploitants complexes

A2 : Exploitants non-complexes

A1 : Exploitants réalisant exclusivement des vols de A vers A

Hélicoptères :

H4 : Exploitants opérant une flotte ou des bases en nombre important

H3 : Autres exploitants complexes

H2 : Exploitants non-complexes

H1 : Exploitants réalisant exclusivement des vols de A vers A

Les autorisations opérationnelles étant traitées par chaque État, l'exploitant peut ensuite obtenir différents agréments selon les opérations qu'il souhaite faire (vols médicaux par exemple).

On pourrait envisager de créer un agrément pour effectuer des vols commerciaux à basse altitude en zone urbaine densément peuplée demandant des assurances supplémentaires. L'agrément serait délivré par les entités étatiques spécialisées pour le transport aérien (la Direction Générale de l'Aviation Civile en France). Tout en respectant la réglementation applicable pour le trafic aérien, la compagnie devrait par exemple justifier d'un manuel d'exploitation pour la gestion des opérations basse altitude comprenant des procédures dans le cadre d'une panne de l'aéronef, ou d'une perturbation étrangère due à leur accessibilité depuis le sol (drone par exemple). Les garanties reposeraient principalement sur le domaine de la sécurité des vols et la formation des pilotes.

Concernant les pilotes, les règles destinées aux pilotes d'hélicoptère, assorti d'une formation adaptée pour les machines plus automatisées, devraient d'appliquer à ceux des VTOL.

Pour conclure, l'urgence réglementaire relève des certificats de type, de la production et de la conception actuellement, dans la mesure où la plupart des aéronefs ne sont pas encore certifiés. Toutefois, certaines décisions prises concernant la certification pourraient avoir des conséquences à plus long terme. En effet, selon ce qui est demandé dans le cahier des charges pour l'obtention d'un certificat de type, il pourrait en découler des règlements relatifs à l'exploitation des aéronefs contraignants. Les décisions d'aujourd'hui peuvent avoir des conséquences importantes demain. Prenons par exemple le cas des nuisances sonores : Tout aéronef génère du bruit, quelle que soit l'étape du vol. Or, les eVTOL ont pour avenir d'être exploités en zone urbaine, généralement densément peuplée. La limite fixée par les autorités au sujet de la « densité » du bruit généré par l'aéronef lors de sa certification ne doit pas avoir, à terme, de conséquences sur l'exploitation. Un eVTOL trop bruyant pourrait se voir limiter son usage sur certains territoires pour préserver la tranquillité des riverains.

La certification repose principalement sur la sécurité des vols avec notamment la redondance des systèmes de propulsion et d'autres systèmes pour accroître la fiabilité des appareils.

Bien qu'ils aient commencé à le faire, les régulateurs devront ensuite se pencher sur l'élaboration du cadre réglementaire pour les opérations aériennes : exploitation des aéronefs de type VTOL, capacité technique de l'exploitant, gestion de l'espace aérien, infrastructures au sol, progrès technologiques...

À l'instar de Boeing et d'E-Hang, de nombreux constructeurs proposent déjà des VTOL capables de voler sans pilote, c'est-à-dire télépilotés comme les drones, ou de façon autonome. C'est pourquoi les autorités devront se pencher sur l'élaboration de la législation pour un usage d'aéronef sans pilote. Au-delà de l'acceptation sociale, cela pourrait impliquer une batterie de tests pour évaluer le système de gestion du pilotage, de la capacité de l'entreprise à reprendre le contrôle de l'appareil manuellement à distance, d'un contrôle du système de communication entre les appareils et le siège de l'exploitant, d'une étude et d'un plan de transition pour passer

d'un trafic aérien constitué d'appareils ayant au moins un pilote à bord vers un trafic d'aéronefs autonomes.

La première étape étant d'autoriser le vol d'eVTOL pilotés permettra d'acquérir de l'expérience et de collecter informations et données en vue de préparer des vols d'eVTOL autonome. Ceci sera réalisable dès lors que des résultats bien établis seront obtenus en matière de sécurité.

Partie 3 : L'intégration des eVTOL dans le paysage urbain est-elle envisageable malgré les contraintes auxquelles ils sont confrontés ?

La mobilité aérienne urbaine est un des piliers de la restructuration du réseau urbain de certaines villes. Certaines agglomérations cherchent à l'intégrer en complément de l'offre de transport actuelle. Nous pouvons compter un nombre de projets relativement important à travers le monde. Nous pouvons citer Düsseldorf, New York, Singapour ou encore Paris et Toulouse en France.

Cette nouvelle forme de mobilité a de nombreux atouts au regard des politiciens. Parmi ces atouts, nous pouvons, entre autres, relever le désenclavement des routes, la réduction des émissions de CO₂ ou la création d'emplois.

Dans cette partie, nous nous intéresserons particulièrement au projet de mobilité urbaine parisien dont le premier vertiport a été inauguré fin 2022 sur l'aérodrome de Pontoise-Cormeilles-en-Vexin (à environ 40 km au nord-ouest de Paris). Ce choix est lié à l'ambition française de mettre en place un réseau de liaisons aériennes pour les Jeux olympiques de 2024. L'échéance fixée est donc la plus courte en Europe et présente implicitement de nombreux résultats.

Nous allons donc nous intéresser aux problématiques opérationnelles liées à la mobilité urbaine aérienne. C'est-à-dire aux infrastructures au sol, aux conditions de vol (gestion du trafic aérien) et à l'acceptabilité sociétale.

Titre 1 : Les infrastructures sont-elles prêtes et adaptées ?

Les aéronefs à décollage et atterrissage verticaux nécessiteront des infrastructures au sol pour décoller, atterrir et être stationnés. Ces infrastructures devront répondre aux besoins de l'industrie en intégrant au moins une piste de décollage et d'atterrissage (nombre variable selon le volume du trafic), des postes de stationnement, des zones de maintenance et de recharge des batteries, des espaces pour le personnel de la plateforme, des salles pour les passagers ainsi qu'un circuit passager. Ces infrastructures, adaptées pour accueillir les VTOL sont appelées « vertiports ».

Afin de répondre à ce besoin, de nombreuses sociétés se positionnent sur le marché des infrastructures et développent des concepts adaptés aux eVTOL. Il semblerait que la majorité des vertiports proposés sont issus d'une collaboration entre avionneurs et acteurs du bâtiment. Certains professionnels (constructeurs de taxis aériens ou promoteurs immobiliers) ont aussi pris le parti de proposer leurs propres concepts. La figure 16 en annexe présente les différents partenariats noués entre les sociétés pour le développement d'infrastructures dédiées aux taxis aériens.

Comme mentionné précédemment, l'aménagement des vertiports et leur nombre sera variable en fonction des villes, de la zone où il se situe et donc, du volume de trafic. Nous pourrions définir trois types d'infrastructures selon leur taille. Les vertipads ayant une voire deux plateformes d'atterrissages, les vertihubs pouvant en compter une dizaine et les vertibases se situant entre les deux. La figure 17 en annexe présente les trois concepts de vertiports.

Il convient de rappeler que la démocratisation des eVTOL en est à ses débuts et que la construction de vertihubs semble démesurée en 2023. Le simple fait que les appareils ne sont pas encore totalement certifiés et que les procédures de vol ne sont pas encore définies

clairement nous rappelle à la raison. Il est judicieux d'exploiter les infrastructures existantes (aérodromes) en les aménageant pour étudier les besoins réels et les bénéfices des eVTOL.

Chapitre 1 : A quelles normes doivent répondre les infrastructures ?

L'EASA a publié, en mars 2022, un document nommé « Prototype Technical Specification for the Design of VFR Vertiports for Operations with Manned VTOL-Capable Aircraft Certified in the Enhanced Category » (PTS-VPT-DSN).³⁰

Ce document est le premier guide mondial qui a été diffusé pour la conception de vertiports. Il prévoit les caractéristiques physiques du vertiport, le marquage au sol, les aides visuelles, et tient compte des éventuels obstacles puisque les vertiports sont voués à être construits en environnement urbain encombré. De plus, il est proposé un concept de vertiport alternatif en-route pour un vol et un atterrissage sûr.

Rédigé en collaboration avec des constructeurs de vertiports, des fabricants d'aéronefs eVTOL et les États membres, l'EASA propose une ébauche du futur cadre réglementaire final. La réglementation complète RMT.230 est en cours de rédaction. Le document RMT.230 a pour but de définir le cadre réglementaire pour l'exploitation de systèmes d'aéronefs sans pilote et pour la mobilité aérienne urbaine dans le système d'aviation de l'Union européenne.

Le consortium d'entreprise Parisien évoqué en introduction a su tirer profit de l'aérodrome de Pontoise dont le groupe ADP détient les droits de gestion.

Skyports, promoteur de la mobilité aérienne avancée britannique et le groupe ADP, gestionnaire aéroportuaire français, ont conçu le premier vertiport parisien sur l'aérodrome. Inauguré en novembre 2022, il permet d'expérimenter le parcours passager (enregistrement et contrôle, temps de parcours, embarquement), l'intégration des aéronefs (procédures liées au déplacement au sol et aux opérations de maintenance et de chargement), la programmation des

³⁰ Traduction : Prototype de spécifications techniques pour la conception de vertiports VFR destinés à être exploités avec des aéronefs VTOL habités certifiés dans la catégorie améliorée

vols et l'information passager en vue du déploiement d'un réseau de transport aérien urbain pour les Jeux olympiques 2024.

Le terminal passager de l'aérodrome a été conçu pour que le parcours passager soit fluide. Chaque passager doit pouvoir être arrivé à destination en moins de 20 minutes, en évitant les embouteillages de l'heure de pointe. « Si un passager passe plus de dix ou quinze minutes dans le terminal, c'est que quelque chose ne va pas. ».³¹

Pour cela, le parcours passager a été optimisé pour être le plus rapide possible. Chaque passager achètera son billet et s'enregistrera à distance, à l'aide d'une application pour téléphone portable. Ainsi, une fois sur place, il lui suffira d'effectuer un scan de reconnaissance faciale pour confirmer son identité pendant qu'un capteur au sol le pèsera. Il pourra ensuite monter à bord de l'appareil pour s'envoler vers sa destination.

Le poids du passager est important puisqu'il permettra à l'aéronef, et au pilote, de calculer la charge des batteries dont il nécessitera.

SITA, premier fournisseur informatique mondial de l'industrie du transport aérien, participe au projet en développant de nouvelles normes d'exploitation et une expérience numérique axée sur les passagers.

Le parcours passager a été conçu pour être le plus rapide possible car les vertiports doivent se soumettre à des contraintes d'espace. Ils ont vocation à être construits en zone urbaine où il n'y a pas beaucoup de place. Il faut donc que les passagers ne s'attardent pas dans les terminaux.

Skyports, leader mondial a su concevoir un terminal compact (115m²) tout en garantissant une expérience confortable aux passagers avec une circulation rapide. Il répond aux normes définies par les régulateurs en termes de sécurité, d'efficacité et de fonctionnalité. Tirant profit d'une expérience internationale, la société britannique s'est positionnée sur le marché des

³¹ D. Walker (patron de Skyports) au journal *Le nouvel économiste*

infrastructures sur tous les continents. Elle a construit, en partenariat avec des constructeurs, le premier vertiport mondial à Singapour, vient de proposer le premier vertiport européen à Paris et étend son savoir-faire aux Etats-Unis (construction d'un vertiport en Californie (avec le fabricant d'eVTOL Joby) et partenariat avec LAZ parking à Los Angeles par exemple), au Moyen-Orient (dont le concept de vertiport qu'elle a proposé pour la ville de Dubaï a été validé par les dirigeants émiratis) ou encore au Japon où elle a ouvert ses premiers bureaux fin 2022. Cette diversité de concepts, et l'expérience acquise avec différents constructeurs à travers le monde lui ont permis de développer des plateformes compatibles avec tous les appareils en cours de développement. Le concept parisien répond donc à l'exigence d'interopérabilité fixée par le groupe parisien afin de ne pas laisser place à une forme de favoritisme envers un constructeur.

Les propriétaires des infrastructures devront aussi signaler toute information nécessaire comme les aéroports le font avec les NOTAM aujourd'hui.

Chapitre 2 : Comment va-t-il être décidé des emplacements des vertiports ?

Section 1 : Qui a la compétence pour choisir ?

Avant de pouvoir proposer des lieux où l'on pourrait construire des vertiports, il semble opportun de se demander qui aura la compétence juridique pour approuver leur construction et proposer un modèle de mobilité aérienne.

En France, la mobilité urbaine est régulée par les autorités organisatrices de mobilité (AOM). Elles ont une compétence locale pour définir et organiser le réseau urbain :

- Des services réguliers de transport public de personnes ou des services à la demande ;
- Des services de transport scolaire ;
- Des services relatifs aux mobilités actives ou aux mobilités partagées (par exemple : services de covoiturage, d'autopartage, de location de bicyclettes, etc.) ;
- Des services de mobilité solidaire ;
- Des services de transport de marchandises ou de la logistique urbaine en cas de carence de l'offre privée.³²

De fait, les AOM devraient obtenir la compétence juridique pour l'organisation de la mobilité urbaine aérienne au regard du droit français. Or, celles-ci ne disposent d'aucune compétence aéronautique puisque c'est la DGAC qui régule le transport aérien et ses infrastructures en France. La question se pose alors de savoir qui, des AOM ou de la DGAC, dispose des compétences juridico-techniques pour définir un réseau de mobilité urbaine aérienne et le réguler.

³² Ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires, « L'organisation de la mobilité en France », Juin 2021

Disponible sur : <https://www.ecologie.gouv.fr/lorganisation-mobilite-en-france>

La solution pourrait être la suivante : L'AOM définit le réseau de mobilité aérienne urbaine dans le cadre de son plan de mobilité, obligatoire dès lors que l'agglomération compte plus de 100 000 habitants. Ce plan de mobilité aérienne devra être présenté à la DGAC avant de pouvoir être validé. Un service de la DGAC dédié à la mobilité aérienne urbaine pourrait alors étudier la proposition de l'AOM et l'approuver ou non. Dans le cas où la faisabilité du projet serait rejetée par la DGAC, une proposition alternative pourra être proposée par la DGAC, et des échanges entre les deux administrations pourront permettre de trouver un compromis assurant sécurité des usagers et des riverains et optimisation du réseau de transport.

Un interlocuteur dédié à chaque AOM pourrait d'ailleurs être désigné au sein de la DGAC pour aiguiller les AOM dans la rédaction de leur plan de mobilité afin que celui-ci soit conforme à la réglementation du transport aérien dès son dépôt.

Section 2 : Quels seront les critères ?

Les projets et le choix des lieux où seront construits les vertiports doivent tenir compte de plusieurs critères :

- Potentiel marché (zones ayant un nombre important de flux) ;
- Accès à l'électricité en grande quantité pour la recharge des batteries ;
- Espace disponible pour y construire les infrastructures nécessaires.

La localisation des infrastructures doit être facilement accessible par les usagers et se trouver dans une zone ayant un potentiel de trafic relativement important. Pour connaître l'emplacement ayant un potentiel de trafic important, les promoteurs immobiliers vont se rapprocher des élus locaux, des chambres de commerce, des conseils départementaux et régionaux qui connaissent leurs territoires et souhaitent développer certains maillages économiques.

La question de l'accès aux sources d'énergie peut facilement être résolue dès lors que l'on considère que l'on construit des infrastructures pour des aéronefs électriques. L'électricité est accessible dans toutes les grandes métropoles pouvant proposer un marché potentiel.

La question de l'espace est plus complexe. Pour des villes comme New York où les buildings sont nombreux, l'aménagement des toits des bâtiments peut facilement être la solution idéale. Cela permettrait non seulement d'exploiter des espaces inutilisés mais en plus de ne pas donner lieu à des problématiques d'espace autour de la zone de décollage/atterrissage puisque l'espace serait dénué d'obstacles.

En revanche, pour des villes comme Paris où les buildings sont beaucoup moins présents, la question se pose du lieu où l'on pourrait construire des vertiports. Pour y répondre, la région a

réalisé une étude dans le cadre des Jeux olympiques 2024. La ville envisage de proposer deux liaisons aériennes majeures :

- La première, entre Paris (hélicoptère de Paris Issy-les-Moulineaux) et Versailles (aérodrome de St-Cyr l'École) ;
- La seconde, entre les aéroports de Paris-Charles de Gaulle et Paris-le Bourget et un site dans Paris (Quai d'Austerlitz).

La ville souhaite donc profiter des infrastructures aéroportuaires existantes en les réaménageant pour y installer un terminal dédié à la mobilité aérienne urbaine. Afin de répondre à l'explosion du trafic dans les prochaines années, le groupe ADP a d'ailleurs intégré des vertiports dans les plans du terminal 4 qui devrait ouvrir ses portes en 2028.

Seul le quai d'Austerlitz ne dispose pas d'infrastructures. Une maquette de vertiport s'inspirant du terminal de Pontoise a été proposée pour le quai d'Austerlitz (voir figure 18 que vous retrouverez en annexe).

Dans d'autres pays, les propositions sont différentes. À Los Angeles, Skyports envisage d'aménager la multitude parking que détient LAZ parking pour y installer des plateformes d'accueil des eVTOL. Les parkings sont répartis dans la ville et cela permettrait de créer comme des parkings-relais pour que les habitants se déplacent via l'offre de mobilité aérienne après avoir stationné leurs véhicules.

La FAA travaille d'ailleurs sur le processus de certification des appareils et l'organisation des infrastructures et du trafic aérien dans le but de proposer un service de taxis aériens pour les Jeux olympiques de 2028.

En Asie, cette fois, six entreprises participent au programme K-UAM Grand Challenge dirigé par le ministère des transports coréen. Ce programme a pour but de développer et exploiter des véhicules aériens ou des services de gestion de l'espace aérien dans l'écosystème

de l'UAM. Le programme regroupe le raffineur de pétrole GS Caltex, la société de télécommunication LG Uplus, l'application de taxi Kakao Mobility, la société de solutions pour drones nationaux Pablo Air le transporteur Jeju Air et le fabricant d'eVTOL Vertical Aerospace.

Ce consortium d'entreprise propose de construire les vertiports dans les stations-service d'ici 2025. Les avantages proposés sont la répartition des stations à travers le pays, l'accès aux bornes de recharge électriques ou à l'hydrogène et l'accès plein air dont elles disposent. Il serait donc simple de construire un toit au-dessus des stations pour construire un vertiport (voir figure 19 en annexe).

En outre, le choix de l'emplacement des vertiports devra tenir compte des routes aériennes définies par la DGAC et des procédures de décollage et d'atterrissage dont nous allons parler dans la prochaine partie.

Titre 2 : Comment les contrôleurs aériens vont-ils organiser les flux de navettes aériennes en zone urbaine ?

Le projet parisien envisage de disposer d'une flotte de dix taxis aériens *VoloCity* produits par le constructeur Volocopter pour desservir les cinq vertiports.

Chaque appareil pourra effectuer deux voire trois vols par heure d'après les autorités.

Or, les résultats des études sur l'aérodrome de Pontoise n'étant pas publiés, nous pouvons nous demander comment vont se dérouler les vols et leur régulation par les contrôleurs aériens.

Durant un an, une vingtaine de vols ont été réalisés pour totaliser près de 200 km de vol. Ces vols ont non seulement permis d'évaluer l'efficacité du terminal et des infrastructures de roulage et de parking de l'aérodrome. Mais ils ont aussi permis de réaliser des essais en vol et simuler des manœuvres d'évitement en situation réelle avec une intégration dans un environnement de gestion du trafic aérien de plus en plus automatisée.

Chapitre 1 : Des procédures de décollage et d'atterrissage précises

Dans le cadre de ses études, l'EASA a défini des normes de décollage et d'atterrissage propres aux eVTOL. Ces procédures sont normées et précises (altitude, vitesse, angle de la pente, etc.). Les constructeurs doivent donc se conformer à celles-ci et proposer un appareil capable de répondre à ces procédures. L'EASA a d'ailleurs publié ces exigences dans le processus de certification des eVTOL.

Plus précisément, vous verrez que l'organisme européen a étudié trois approches à ce sujet selon l'emplacement et l'environnement avoisinant du vertiport. En annexe (figure 20) se trouve un schéma avec les trois types de décollage possible.

Comme tout appareil qui décolle nécessite d'atterrir à un moment donné, les régulateurs ont également prévu une procédure d'atterrissage (que vous retrouverez en annexe, figure 21). Celle-ci prévoit l'approche vers le vertiport et le moment où le pilote devra décider s'il remet les gaz ou non (point LDP). Considérant qu'il est possible de remettre les gaz, la procédure est également donnée (vitesses et altitude) pour repartir.

De plus, l'EASA a défini des espaces en 3D, dans lesquels les eVTOL pourront évoluer au départ de la plateforme d'atterrissage. Vous trouverez en annexe 21 la surface définie par l'EASA. Cet espace a été fait de façon à ce que les eVTOL puissent décoller verticalement en évitant les obstacles environnants, puis, à partir d'une certaine altitude, il n'y aura plus d'obstacle et ils pourront commencer la croisière de leur vol. Un schéma de ladite surface se trouve en annexe (figure 22).

L'exemple de Cologne donné en annexe prévoit deux axes de décollage ou d'atterrissage. Il est aussi possible de proposer un espace sans obstacle dans toutes les directions et donc, une possibilité pour l'appareil de partir dans la direction de son choix. Les dimensions ne sont alors pas les mêmes entre les deux surfaces libres d'obstacle. Par exemple, l'espace de manœuvre en approche finale ou au décollage (FATO) doit être de $1D$ pour $FATO_{back}$ et de $1D$ pour $FATO_{front}$ soit

au total $2D$. D étant le diamètre le plus important de l'appareil. Maintenant, si le gestionnaire du vertiport souhaite proposer un départ ou arrivé de tout horizon, il devra au total respecter une distance de $2.83D$ soit $0.83D$ de plus.

Dans l'éventualité où il y a un obstacle dans la zone de départ omnidirectionnelle. Le gestionnaire du vertiport devra interdire l'accès sur une partie du cercle. Il va par exemple considérer que de 10° à 40° sur le cercle autour du vertiport, il y a un obstacle et que l'arrivée ou le départ d'un appareil ne peut se faire dans cette direction. Un schéma en annexe (figure 23) présente un exemple.

Chapitre 2 : La gestion du trafic aérien En-route

Tout d'abord, il semblerait que les pilotes effectueraient des vols à vue (sous le statut Visual Flight Rules VFR) les premières années. Tant que le volume de trafic aérien reste acceptable, ce type de vol peut être envisagé.

Ce n'est que dans les prochaines années, lorsque les eVTOL se démocratiseront et qu'ils seront de plus en plus nombreux dans le ciel qu'il faudra revoir les règles et, potentiellement, passer au vol aux instruments (IFR).

Dans le cadre de ces vols, l'industrie aéronautique travaille sur de nouveaux systèmes qui permettraient de limiter drastiquement le nombre d'accidents aériens en vol (il y a en moyenne 6 collisions par an d'après l'EASA). Pour ce faire, nous pouvons citer :

- Un écran dans l'avion qui afficherait la position de l'avion, celle des aéronefs qui l'entoure et la météo en temps réel par le biais d'échange d'information.
- Le système de gestion du trafic aérien U-Space qui comprend de nouveaux services et des procédures spécifiques sans ségrégation de l'espace aérien.

Actuellement, grâce à de nombreux systèmes, nous pouvons localiser un avion dans l'espace aérien en temps réel. En revanche, sa position n'est pas retransmise aux autres appareils dans la zone. L'idée serait que chaque appareil serait interconnecté pour permettre de situer les autres et éviter tout accident aérien. Cela donnerait au pilote une idée précise de ce qu'il peut faire ou non par rapport aux autres.

U-Space est un programme qui permettrait de regrouper toutes les informations nécessaires à la gestion des flux aériens : météo, localisation des avions, espaces aériens fermés, etc.

Celui-ci proposerait et anticiperait les solutions appropriées pour une gestion optimale du trafic aérien. De plus, il prendrait en considération les avions, hélicoptères, drones, taxis aériens ou tout autre aéronef. Ce système serait donc efficace à toute altitude et tiendrait également compte de la vie privée des riverains, de la sécurité et d'autres critères similaires dans la gestion du trafic en temps réel.

Actuellement, la gestion du trafic aérien urbain et non-urbain est séparée. À terme, U-Sapce devrait permettre de regrouper tous les flux aériens, qu'ils soient urbains (à basse altitude) ou non avec une intégration progressive. Le schéma en annexe (figure 24) présente le modèle envisagé.

Comme dit précédemment, les vols à vue seraient privilégiés dans un premier temps.

L'OACI a classifié les espaces aériens selon plusieurs critères, dont le type de vol (VFR ou IFR) dans l'annexe 11, Chapitre 2, Section 2.6. Vous trouverez un extrait de l'article en annexe 25.

Les opérateurs pourraient alors exploiter ces espaces aériens pour effectuer des vols. Des couloirs existent d'ores-et-déjà. Le schéma en annexe 26 présente un exemple de vol et les transitions entre les espaces aériens que cela impliquerait.

Nous pouvons penser que les régulateurs utiliseront des corridors de façon à limiter au maximum le survol de zones habitées.

Actuellement, en aviation commerciale, des routes aériennes ont été créées à plusieurs niveaux d'altitude afin de pouvoir réguler le trafic aisément via les points qui se trouvent sur les routes. Même si cela tend à disparaître, nous pourrions envisager une organisation similaire, à terme, pour la gestion des flux de taxis aériens.

Nous pourrions imaginer des couloirs aériens avec des sens de circulation unique, des cylindres pour effectuer des changements de niveau ou de direction à intervalles réguliers, autour desquels les aéronefs tourneront. Ce concept de trafic aérien n'est pas nécessaire aujourd'hui, mais pourrait être envisagé à long terme. Le schéma en annexe 27 présente ce concept.

Titre 3 : Les habitants des différentes métropoles sont-ils prêts à accepter ce type de mobilité ?

Le développement des nouvelles technologies de type VTOL génère des avantages et des risques. À la fois pour les usagers, mais aussi pour le public en général. La figure 28 en annexe présente le rapport bénéfice-risque pour chaque usage que l'on pourrait donner aux VTOL.

Deux bénéfices majeurs sortent du lot lorsque l'on parle de mobilité aérienne urbaine : l'impact économique qu'aura les VTOL en Europe et dans le reste du monde et l'impact environnemental.

Les risques et facteurs d'oppositions sont eux aussi nombreux :

- Nuisances sonores (phases de décollage/atterrissage et en vol)
- La sécurité qui pourrait avoir un impact sur l'acceptation du public
- La vie privée puisque les UAM survoleraient les logements
- La pollution visuelle
- La perte d'emplois dans certains secteurs d'activités comme la logistique ou les taxis
- L'impact environnemental : Bien que les émissions de CO2 soient neutres, la production des composants des aéronefs et de l'électricité remet l'argument phare des constructeurs. Un travail doit être fait pour réduire les émissions globales lors de la production des VTOL.
- L'abordabilité : ce mode de transport doit être à la disposition de tous et non réservé aux personnes les plus aisées. Toute la population devra accepter les nuisances de cette nouvelle mobilité. Or, si seulement peu de personnes peuvent se permettre de voyager à bord des taxis aériens, la faisabilité des projets sera remise en question.

L'acceptabilité sociétale est un des enjeux majeurs au développement des aéronefs à décollage et atterrissage verticaux. En effet, si les populations des différentes villes pour lesquelles les constructeurs et opérateurs de ce type d'aéronef ont un intérêt à s'y implanter ne désirent pas laisser place à la mobilité urbaine aérienne, la viabilité de ces projets sera remise en cause.

C'est pourquoi les acteurs travaillent activement afin d'apporter des réponses aux personnes réticentes et proposer des solutions à ce qui pourrait être un frein au développement de ces nouvelles technologies.

Les citoyens touchés par la mobilité urbaine aérienne ne sont pas tous raccord avec ce concept. En effet, le rapport sur l'acceptabilité sociétale de la mobilité urbaine aérienne publié par l'EASA en 2021 souligne une certaine réticence de la part d'une partie de la population. Sur un panel de 3690 personnes, 29% ne se disent pas favorable à devenir utilisateur de la mobilité urbaine aérienne (figure 29 en annexe). Mais pour quelle raison ?

188 facteurs d'acceptation sociétale ont été cités par les personnes interrogées lors de l'enquête menée par l'EASA³³, qui s'est concentrée sur l'acceptabilité des drones et des aéronefs VTOL pilotés dotés de systèmes de propulsion électrique. Les résultats de cette enquête en annexe (figure 30) soulèvent de nombreuses attentes de la part du public : sécurité, sûreté, bruit ou encore impact sur l'environnement (nuisances sonores et visuelles, pollutions, etc.).

Certains facteurs ont été cités à de multiples reprises et représentent une part significative des contraintes auxquelles vont faire face les constructeurs, opérateurs et régulateurs avant le déploiement des taxis aériens.

Parmi les plus cités, nous retrouvons les nuisances sonores et visuelles, la sécurité, la vie privée et la non-reconnaissance des bénéfices pour la société.

³³ EASA, « Study on the societal acceptance of Urban Air Mobility in Europe », Mai 2021, page 18

Concernant la sécurité, les constructeurs ont conscience de l'importance de ce critère d'acceptabilité sociétale. Les régulateurs aussi et exigent des prérequis précis.

Les constructeurs, opérateurs et régulateurs nationaux devront communiquer activement pour justifier de la fiabilité des appareils jusqu'à ce qu'ils fassent partie de la norme. Ils devront aussi le prouver à leurs futurs utilisateurs qui s'interrogent sur la sécurité et la sûreté. L'utilisation de l'appareil à des fins criminelles, directement ou via une cyberattaque est au cœur des préoccupations des personnes interrogées. Pour ce faire, les acteurs du transport aérien peuvent s'appuyer sur des chiffres précis : Si le transport de passagers UAM atteint le même niveau de sécurité que l'aviation au sein de l'UE en 2018 (0,01 décès par milliard de passagers-kilomètres), il serait alors environ 1 500 fois plus sûr sur la base du passager-kilomètre que le transport routier.

Les villes particulièrement encombrées sont les premières cibles commerciales des VTOL puisque les aéronefs permettent de désenclaver les routes en transportant des personnes par les airs. Or, ces mêmes villes ont connu l'émergence des motos-taxis. Ces motos permettent de gagner du temps en slalomant entre les voitures et pourraient être un concurrent aux VTOL. Une équation pourrait alors être trouvée afin que les usagers retrouvent une plus-value en l'utilisation des VTOL. Cette équation tiendrait compte de plusieurs facteurs : prix, gain de temps généré, sécurité...

Pour répondre au gain de temps, des études ont été faites dans deux villes européennes : Paris et Berlin à une heure de pointe. Il ressort de cette étude que les taxis aériens permettraient d'être 2 à 4 fois plus rapide que la voiture pour se déplacer du centre-ville à un aéroport parisien.³⁴

Le résultat est similaire à Berlin, dont l'étude a été menée pour une urgence médicale. Le transport d'organes entre deux hôpitaux serait 3 fois plus rapide que par ambulance.²⁷

³⁴ EASA, « Study on the societal acceptance of Urban Air Mobility in Europe », Mai 2021, Page 31

Chapitre 1 : Les nuisances sonores, visuelles et vibratoires

Les inquiétudes pour les nuisances liées au confort des habitants reviennent régulièrement dans les causes.

Constructeurs et régulateurs ont conscience des enjeux et cherchent à les réduire au maximum.

En Europe, l'EASA ne souhaitait pas définir de niveau de bruit pour l'usage des eVTOL. La raison est que les taxis aériens sont nouveaux et le profil de bruit de ces appareils n'était pas encore connu en détail. L'EASA recueillait des données et réfléchissait, elle comptait mettre des limites dans le futur si elle le jugeait nécessaire. C'est chose faite, en mai 2023, les régulateurs européens ont publié un document³⁵ dans lequel se trouvent les niveaux de bruit maximum à chaque étape de vol par rapport à la masse de l'appareil. Le document reprend également les conditions et la façon dont les tests doivent être effectués. Le tableau en annexe 31 présente les niveaux de bruit perceptible maximum pour trois phases de vol. Les résultats aux tests doivent justifier de :

- Lors du décollage, entre 76 et 106 EPNdB (Effective Perceived Noise Level) en fonction de la masse de l'appareil ;
- Lors du survol, entre 84 et 104 EPNdB en fonction de la masse de l'appareil ;
- Lors de l'atterrissage, entre 89 et 109 EPNdB en fonction de la masse de l'appareil ;

Toujours est-il que les entreprises savent que le bruit est essentiel à l'acceptation du public. C'est pourquoi elles déploient beaucoup d'efforts dans la conception et des essais pour limiter le bruit de leurs appareils.

³⁵ EASA, « Consultation Paper: Environmental protection technical specification applicable to eVTOL powered by multiple, vertical, non-tilting, evenly distributed rotors », publié en mai 2023

Dans le cadre des essais sur l'aérodrome de Pontoise, le groupe d'entreprises a réalisé des essais sur l'appareil de Volocopter (C2X) pour évaluer les impacts acoustiques et vibratoires.

Il en découle que le niveau d'émission moyen mesuré est de 76 dB(A), soit en deçà du niveau de bruit d'un autobus thermique. Ces tests ont été réalisés pour trois conditions de vol : survol (25 et 50 mètres d'altitude), stationnaire (7 et 25 mètres d'altitude) et décollage / atterrissage.

À Pontoise également, des étudiants ont fait un sondage. Les résultats montrent que 86% des visiteurs ne s'attendaient pas à une telle perception de l'impact sonore, vécu comme moins bruyant qu'imaginé.

M. Cazé, directeur de Caps Aéro, affirme que les drones qu'il compte utiliser dans le cadre de la mobilité aérienne urbaine seront inaudibles et suffisamment petits pour ne pas être vus à partir de 300 / 350 mètres d'altitude. Le décollage d'un drone prend moins d'une minute et le bruit généré est d'environ 65 dB. Afin d'obtenir ce résultat et réduire au maximum les nuisances sonores, les unités de propulsions sont carénées.

Chapitre 2 : L'impact environnemental

L'impact potentiel sur les animaux, en particulier les créatures aériennes telles que les oiseaux, les chauves-souris et les insectes est un problème souvent signalé par les personnes interrogées sur la mobilité aérienne urbaine.

Les aéronefs à décollage et atterrissage vertical sont ; dans l'ensemble, plus silencieux que les hélicoptères. De fait, ils donnent moins d'avertissements aux oiseaux. La FAA souhaite donc proposer une exigence de frappe d'oiseaux plus complète sur les aérodromes pour répondre aux risques d'un impact d'oiseau avec l'aéronef. Une évaluation menée aux Etats-Unis les amène à penser qu'il faut étendre les frappes d'oiseaux à tout volatile de plus d'un kilogramme (2.2 lbs). Les régulateurs proposent également une exigence de dispositifs de dissuasion des oiseaux.

Non seulement les taxis volants sont moins bruyants que les hélicoptères, mais ils ne devraient utiliser aucune énergie fossile. Équipés de batteries, ils seront rechargés à partir d'une source d'électricité renouvelable. Ils sont donc plus écologiques que les aéronefs « standards ».

La plupart des concepts VTOL s'appuient sur un système de propulsion électrique. Rares sont ceux qui proposent une alimentation hybride. L'usage de l'électricité permet de justifier d'une empreinte carbone minimale, voire nulle dans l'environnement urbain.

Cette nouvelle forme de mobilité s'intègre pleinement dans les objectifs français d'atteindre la neutralité carbone d'ici 2050 comme indiqué dans la feuille de route de la stratégie nationale bas carbone. Cela permettra de réduire les émissions de gaz à effet de serre du transport routier qui, en France, représente 97% des émissions du secteur des transports. Entre 2008 et 2019, la voiture était le premier moyen de transport choisi par 63% de Français pour leurs déplacements.

Chapitre 3 : L'impact économique

Le développement des taxis aérien en ville aurait un impact sur quatre grands groupes de parties-prenantes :

1. L'industrie de la mobilité aérienne urbaine

Ce groupe regroupe les constructeurs, les opérateurs, les services de maintenance, les exploitants d'aéroports et de vertiports à terme, les prestataires de services et de communication, les divers fournisseurs. Ils ont pour motivation de dégager des profits grâce à leur activité, le développement de nouvelles technologies et, parfois, être précurseur. Ce groupe de partie-prenante fait face à diverses problématiques : environnementales, réglementaires ou d'opinion publique.

2. Les usagers potentiels

Le marché des taxis volants toucherait un certain nombre de personnes : citadins, voyageurs, automobilistes, usagers des transports en commun ou encore les services d'urgence. Les utilisateurs potentiels ont des attentes plutôt que des contraintes. Ils vont chercher un rapport qualité-prix-gain de temps-confort conforme à leurs besoins. Si l'équation n'y répond pas, ces usagers conserveront leurs habitudes pré-eVTOL. En revanche, leurs attentes ne se limitent pas seulement à ces quatre points, ils seront également regardants sur la sécurité, la fiabilité, la facilité d'utilisation ou la commodité.

3. Les gouvernements, administrations publiques et régulateurs

Les organismes concernés sont à trois niveaux :

- International : institutions et organes de l'UE, EASA,

- National organisations de contrôle du trafic aérien, gouvernements et autorités des États, armée et police
- Local : Autorités locales, municipalités, fonctionnaires de la ville, urbanistes, institutions et organismes publics

Les régulateurs et gouvernements doivent répondre à des enjeux économique-politiques au sujet des eVTOL. Ils sont chargés de l'écriture de la réglementation pour la certification des aéronefs et des constructeurs ou encore de l'opérabilité des aéronefs. Ils doivent donc trouver un consortium qui réponde aux attentes des différentes parties prenantes. Comme pour le transport aérien, le bien public, et notamment des passagers, sera primordial. C'est pourquoi les régulateurs mettront un point d'honneur pour que la sécurité et le bien-être du public soient assurés. La mobilité aérienne devra également tenir compte de l'opinion publique et des enjeux du XXIème siècle : système de mobilité efficace, limitation de la congestion et de la pollution, création d'emplois... Des réponses devront être apportées par les régulateurs sans pour autant nuire au développement d'une industrie émergente par une réglementation trop restrictive.

4. Les tiers indirectement impactés

Les tiers étant impactés de loin sont nombreux : Parmi eux, nous retrouvons les particuliers (habitants, collectivités, propriétaires immobiliers, citoyen), des professionnels (pilotes, universitaires, innovateurs), des associations (associations locales de protection de l'environnement ou de voyageurs, syndicats, lobbies, groupes environnementaux) ou encore des acteurs ayant un lien plus ou moins important avec la mobilité aérienne urbaine (industrie automobile, fournisseurs d'énergie, fournisseurs de transports publics, assureurs, courtiers en billets).

Subdivisé en quatre groupes, il évaluera l'impact de cette nouvelle forme de mobilité pour eux-mêmes et pour la société. Les préoccupations de ces acteurs sont toutes étroitement liées au développement de cette technologie. Son émergence pourrait avoir un impact sur le bien-être, l'emploi ou la finance pour les entreprises concurrentes.

Le développement des VTOL dans les grandes agglomérations européennes pourrait avoir un impact sur l'économie locale, nationale et internationale. En effet, les retombées économiques seraient importantes pour l'industrie, mais aussi pour de nombreux acteurs extérieurs. L'EASA estime que le marché pourrait représenter 4,2 milliards d'euros en Europe d'ici 2030.

Plus gratifiant encore au regard de la population, 90 000 emplois (dont 4 500 postes de pilote) seraient créés sur le continent par leur développement pour la construction des infrastructures et l'exploitation des eVTOL. Les emplois manufacturiers étant exclus, car encore trop incertains. Ces valeurs représenteraient 1/3 de l'impact qu'auraient les eVTOL sur le marché mondial.³⁶

Les coûts de recherche, de développement et de production des VTOL sont importants. De plus, aucune infrastructure existante à l'exception des aérodromes déjà présents sur un territoire ne permet d'exploiter les VTOL. Cependant, les aéroports se situent généralement à l'extérieur des villes pour des raisons évidentes de nuisances et d'espace. C'est pourquoi de nombreux investissements doivent être faits en termes d'infrastructures : d'une part pour adapter les aéroports actuels en y construisant des zones de maintenance et de recharge des batteries par exemple ; d'autre part pour construire des bâtiments adaptés en cœur de ville et permettre un usage en ville. Il faudrait donc que les exploitants veillent à ne pas reporter le coût des investissements sur les usagers et conserver un coût abordable pour tous, sans pour autant rendre ce projet irréalisable financièrement. L'accessibilité pour tous est importante, ce nouveau moyen de transport ne doit pas devenir exclusif aux classes sociales les plus aisées.

Les constructeurs d'eVTOL en ont conscience et cherchent des solutions pour réduire au maximum les coûts d'exploitation des appareils. Fabien NESTMANN, responsable de la politique publique chez Volocopter l'affirme : « Nous allons faire en sorte que nos opérations soient

³⁶ McKinsey Center for Futur Air Mobility UAM Market Model

suffisamment efficaces pour réduire les coûts par vol et rendre ce nouveau moyen de transport accessible à beaucoup de monde. »³⁷

De plus, les entreprises porteuses de projets d'eVTOL qui s'implanteront sur un territoire financeront les tâches gouvernementales liées à ces concepts par l'impôt. Aussi, lorsque le cadre réglementaire et les organismes régulateurs seront en place, les investissements pour assurer le suivi des opérations seront moins onéreux pour les gouvernements. De fait, aucun fond étatique ne devrait être nécessaire pour régler les factures de la mobilité urbaine aérienne.

Le dernier débat étant celui de l'abordabilité des vols. Les futurs usagers s'inquiètent quant au prix des vols pour effectuer un trajet de quelques minutes. Il ne devrait pas que ce moyen de transport devienne exclusif aux personnes les plus aisées. D'autant plus que cela restreindrait encore l'acceptabilité des appareils.

Les constructeurs misent sur le fait que les eVTOL seront plus faciles à entretenir et à concevoir que des hélicoptères pour réduire la facture de l'utilisateur.

À Chicago, United Airlines devrait assurer d'ici 2025, la première liaison entre l'aéroport O'Hare et le centre-ville. Ayant passé une commande de 200 appareils Midnight eVTOL du constructeur Archer pour un milliard de dollars, l'opérateur et le constructeur aspirent à pouvoir concurrencer les taxis et VTC routiers. Le coût de ce trajet ne devra pas dépasser 100\$, le prix d'un Uber Black pour le même trajet. D'après les caractéristiques de l'appareil, le vol durerait 10 minutes. Le coût serait donc de 10\$/minute soit 600\$ par heure de vol : une facture relativement basse comparée au coût d'un aéronef classique.

³⁷ F. NESTMANN (Responsable politique publique chez Volocopter), aviation civile Le magazine de la Direction Générale de l'Aviation Civile n°393, page 21, Octobre 2021

En France, cette fois, Augustin de Romanet, PDG du groupe ADP a annoncé lors d'une interview le 16 mai 2023 sur France TV, que les billets pour un trajet d'environ 20km à Paris seraient d'environ 110 euros.

Le constructeur ne croit pas en la viabilité de ces lignes, mais souhaite s'appuyer dessus pour apprendre, parfaire et optimiser la vente de ses services par l'exploitation de lignes de transport de passager régulières.³⁸

Les coûts d'exploitation devraient baisser dans les prochaines années pour plusieurs raisons : Dès lors que les vols autonomes seront autorisés, les pilotes à bord ne seront plus nécessaires, il suffira d'un pilote pour superviser un certain nombre de vol ce qui réduira les coûts liés à la masse salariale, principale dépense d'une entreprise et cela permettra de vendre une place supplémentaire sur tous les vols. Aussi, l'évolution technologique des batteries devrait permettre d'avoir des batteries plus performantes ayant une meilleure autonomie et, de fait, des recharges moins fréquentes. De plus, leur poids se verrait diminuer et le coût d'exploitation devrait être réduit.

³⁸ J-B HEGUY, Air et Cosmos n°2787, page 23, Juin 2022

Conclusion

La mobilité aérienne urbaine, utopie ou réalité ?

- Réalité.

Le transport de passagers serait la fonction première des eVTOL d'après la communauté aéronautique. Or, les constructeurs envisagent de diversifier les fonctions de leurs appareils en proposant des versions de eVTOL adaptées pour un usage médical ou le transport de fret.

« Tout le monde pense aux taxis volants quand on parle de mobilité aérienne avancée, mais c'est beaucoup plus que ça », Mirko Hornung, directeur de la recherche et de la technologie à Bauhaus Luftfahrt e.V., un groupe de réflexion allemand sur l'avenir de l'aviation.

Dans le cadre du transport de marchandises, les transporteurs travaillent d'ores-et-déjà sur des projets pour proposer des livraisons par drones. Ces projets ayant vu le jour bien avant l'émergence des concepts de taxis aériens, le marché n'est pas forcément adapté pour les fabricants de VTOL.

En revanche, bénéficier d'un aéronef de type VTOL serait un véritable atout aux yeux des services d'urgences. En effet, cela pourrait permettre de transporter du personnel médical et des patients grièvement blessés plus rapidement que par la route. L'hélicoptère, actuellement utilisé, ne permet pas de se poser partout, les eVTOL pourraient accéder à plus d'endroits grâce au développement des infrastructures adaptées. De plus, l'usage d'une source d'énergie électrique en substitution du kérosène réduirait drastiquement les frais d'interventions des services médicaux. Un partenariat a d'ailleurs été trouvé entre le fabricant Volocopter qui a déjà proposé une version médicale de son appareil, et ADAF Luftrettung, un prestataire médical aérien allemand qui serait intéressé ne serait-ce que par des eVTOL en version passager pour pouvoir transporter des médecins plus rapidement lors des interventions. En France, l'Assistance Publique – Hôpitaux de Paris (AP-HP) travaille avec les groupes ADP et RATP pour évaluer l'usage d'aéronefs à décollage et atterrissage vertical au service de trois besoins de transport : le transport de matériel biologique, de blessés légers ou de médecins spécialisés.

Finalement, ces engins volants peuvent avoir de multiples fonctions : usage pour les services d'urgence, le transport de marchandises, le transport de personnes, la police et l'armée, le tourisme...

L'année prochaine, des billets pour effectuer un trajet en eVTOL vont être mis à la vente à Paris, pendant les Jeux olympiques. Ce sera la première commercialisation de ce type de mobilité à travers le monde.

Ce sera l'occasion pour les acteurs de l'industrie de prouver la fiabilité et la discrétion des appareils, notamment auprès des personnes réticentes.

Même si l'idée de voler pour traverser la ville n'est pas acceptée par tous, la démocratisation de ce type d'appareil, et l'usage des eVTOL par les services d'urgence devrait habituer les citoyens à ce type de véhicule au-dessus de leurs têtes. Naturellement, ils devraient tous l'accepter avec le temps.

De plus, la communication des industriels et régulateurs au sujet des eVTOL tient un rôle important et peut grandement influencer le point de vue des citoyens.

En 2018, Uber estimait que les premiers taxis aériens voleraient commercialement à Dallas ou à Los Angeles dès 2023.

En 2023, nous constatons que les projets de taxis aériens ont pris du retard, particulièrement dû aux problématiques de certification de ces appareils innovants. La mobilité aérienne urbaine se fait de plus en plus réelle, ce n'est plus qu'une question de temps pour savoir quand les opérations commerciales pourront se développer « librement » dans le monde.

Bibliographie

I. Textes réglementaire

Règlement délégué 2022/1645 de la commission européenne du 14 juillet 2022

Règlement d'exécution 2023/203 de la commission européenne du 27 octobre 2022

Title 14, « Aeraunotics and space », *Code of Federal Regulations*

Work instruction n° WI.CERT.00146-001, « CRI and CAI writing and management », EASA, approuvé le 16 juin 2020

Terms of reference for rulemaking task RMT.0230, « Introduction of a regulatory framework for the operation of unmanned aircraft systems and for urban air mobility in the European Union aviation system – Issue 4 », EASA, Décembre 2022

EASA, « SC E-19 Electric / Hybrid Propulsion System – CRI Consultation paper », Avril 2021

EASA, « SC E-19 Electric / Hybrid Propulsion System – Comment response document », Avril 2021

Document n° SC-VTOL-01, « Special Condition Vertical Take-Off and Landing (VTOL) Aircraft », EASA, Juillet 2019

Doc n° MOC-2-SC-VTOL Issue 2 « Second publication of Means of Compliance with the special condition VTOL », EASA, Juin 2022

Comment Response Document for MOC-2-SC-VTOL Issue 2

Document n° MOC-2-SC-VTOL Issue 3 « Second publication of Means of Compliance with the special condition VTOL », EASA, Décembre 2022

EASA, « Prototype Technical Specification for the Design of VFR Vertiports for Operations with Manned VTOL-Capable Aircraft Certified in the Enhanced Category » (PTS-VPT-DSN), Mars 2022

EASA, « Consultation Paper: Environmental protection technical specification applicable to eVTOL powered by multiple, vertical, non-tilting, evenly distributed rotors », Mai 2023

EASA, « Artificial intelligence roadmap 2.0, Human-centric approach to AI in aviation », Mai 2023,

Order n° 8110.4C, « Certification type », FAA

Document n° 83 FR 21850, « Accepted Means of Compliance; Airworthiness Standards: Normal Category Airplanes », FAA

« Small Airplane Issues List », FAA, Q1 2022

« Small Airplane Issues List », FAA, Q2 2023

Assembly – 40th Session, « Resolutions adopted at the 40th session of the assembly », ICAO, Octobre 2019

II. Articles

Airbus, « Airbus high-voltage battery technology prepares for Ecopulse flight test and beyond », Mars 2022

Disponible sur : <https://www.airbus.com/en/newsroom/news/2022-03-airbus-high-voltage-battery-technology-prepares-for-ecopulse-flight-test>

Airport Lifestyle, « Bird strikes: How common are they? »

Disponible sur : <https://airportlifestyle.com/bird-strikes/#:~:text=According%20to%20the%20Federal%20Aviation,bird%20strikes%20becoming%20more%20common%3F>

Air & Cosmos International, « LYTE Aviation unveils its 40-seat hybrid eVTOL, SkyBus and SkyTruck », Mars 2023

Disponible sur : <https://aircosmosinternational.com/article/lyte-aviation-unveils-its-40-seat-hybrid-evtol-skybus-and-skytruck-3745>

Air Journal, « United Airlines dévoile le premier trajet passagers eVTOL à partir de 2025 », Mars 2023

Disponible sur : <https://www.air-journal.fr/2023-03-26-united-airlines-devoile-le-premier-trajet-passagers-evtol-a-partir-de-2025-5247450.html>

Air Traffic Management, « SITA and Volocopter collaborate on digital infrastructure for vertiports », Mars 2023

Disponible sur : <https://www.airtrafficmanagement.net/article/sita-and-volocopter-collaborate-digital-infrastructure-vertiports>

Akihabara News, « Skyports opens Tokyo office », Octobre 2022

Disponible sur : <https://akihabaranews.com/skyports-opens-tokyo-office/>

Apluslaboratories, « Aerospace structural testing »

Disponible sur : <https://www.appluslaboratories.com/global/en/what-we-do/service-sheet/aerospace-structural-testing>

Aviation week, « Airbus eyes delayed H160 FAA certification in 2023 », Février 2023

Disponible sur : <https://aviationweek.com/business-aviation/safety-ops-regulation/airbus-eyes-delayed-h160-faa-certification-2023>

BAE Systems, « What is Advanced Air Mobility? »

Disponible sur : <https://www.baesystems.com/en-us/definition/what-is-advanced-air-mobility>

A. BACCHINI et E. CESTINO, « Electric VTOL Configurations Comparision », Aerospace 6 n°3.26, Février 2019

Disponible sur : <https://www.mdpi.com/2226-4310/6/3/26#B26-aerospace-06-00026>

Banque des territoires, VILAGIL, « Territoire d'innovation – 24 projets lauréats », *Dossier de presse*, Septembre 2019, page 29

W. Bellamy, « EASA expects certification of first artificial intelligence for aircraft systems by 2025 », Avionics International, Février 2020

Disponible sur : <https://www.aviationtoday.com/2020/02/19/easa-expects-certification-first-artificial-intelligence-aircraft-systems-2025/>

J. Biba, « What are eVTOLs? Are they the futur of aviation? », BuiltIn, Février 2023

Disponible sur : <https://builtin.com/transportation-tech/evtol-aircraft>

B. Carey, « FAA, EASA leaders describe approaches to AAM », Aviation Week Network, Octobre 2022

Disponible sur : <https://aviationweek.com/shownews/nbaa/faa-easa-leaders-describe-approaches-aam>

D. Caze (directeur général de l'aviation civile), « Éditorial de Damien Cazé », *aviation civile Le magazine de la Direction générale de l'aviation civile n°393*, Octobre 2021, page 3

H. Cormier, « Le nouvel horizon de la mobilité aérienne urbaine », *aviation civile Le magazine de la Direction générale de l'aviation civile n°393*, Octobre 2021, page 12 à 21

Csuweb, « Voitures électriques : Principe de fonctionnement »

Disponible sur : <https://www.csuweb.net/site/index.php/voyages-visites/visites/42-articles/articles-vehicules-electriques/231-voiture-electrique-principe-de-fonctionnement?showall=1>

EASA, « Design Organisations Approvals »

Disponible sur : <https://www.easa.europa.eu/en/domains/aircraft-products/design-organisations/design-organisations-approvals#group-easa-downloads>

E-Hang, « DHL-Sinotrans and Ehang jointly launch first fully-automated and intelligent urban drone delivery solution in China »

Disponible sur : <https://www.ehang.com/news/497.html>

J. El Hassani, « Faire voler des VTOL d'ici 2024, un défi (trop ?) olympique pour ADP et RATP », *Journal du Net*, Novembre 2021

Disponible sur : <https://www.journaldunet.com/economie/transport/1506981-a-pontoise-la-ratp-et-adp-lancent-leur-programme-d-experimentation-de-drones-de-transport/>

A. Ellis Matthews et J. Trock, « Regulation and Certification of Electric Vertical Take-off and Landing (eVTOL) Aircraft », *Baker McKenzie*, Janvier 2022

Disponible sur : <https://www.bakermckenzie.com/en/insight/publications/2022/01/regulation-certification-evtol-aircraft>

Futura, « Ils ont piraté une Tesla avec un drone DJI »

Disponible sur : <https://www.futura-sciences.com/tech/actualites/voiture-electrique-ils-ont-pirate-tesla-drone-dji-87197/>

Futura, « Airbus a testé un vol complet sans pilote sur un A350 »

Disponible sur : <https://www.futura-sciences.com/tech/actualites/technologie-airbus-teste-vol-complet-pilote-a350-82195/>

C. Gaillard, « Comment garantir la cybersécurité des véhicules connectés ? », *L'automobile et l'entreprise*, Avril 2022

Disponible sur : <https://www.auto-infos.fr/article/comment-garantir-la-cybersecurite-des-vehicules-connectes.248722>

Groupe ADP, « Des taxis volants dans le ciel de Paris »

Disponible sur : <https://www.parisaeroport.fr/groupe/strategie/innovation/nos-projets-innovation/projet-taxis-volants>

S. Goulding Caroll, « Selon le régulateur européen, les taxis volants seront une réalité « d'ici trois à cinq ans » », *EURACTIV*, Mai 2021

Disponible sur : <https://www.euractiv.fr/section/plan-te/news/eu-regulator-predicts-urban-air-taxis-will-be-a-reality-within-five-years/>

M. Guaino, « Débit 5G : Quelle vitesse de navigation avec la 5G ? », *Echos du Net*, Mars 2023

Disponible sur : <https://www.echosdunet.net/dossiers/reseau-5g/debit#:~:text=La%205G%20est%20jusqu%27à,bien%20loin%20du%20théorique%20maximum.>

Horizon Europe, « ATM application-oriented research for U-Space and urban air mobility », *Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche*

Disponible sur : <https://www.horizon-europe.gouv.fr/atm-application-oriented-research-u-space-and-urban-air-mobility-30105>

Internet Anywhere, « Quelle bande passante pour un streaming vidéo en direct ? », Juillet 2022

Disponible sur : <https://www.internetanywhere.fr/bande-passante-pour-un-streaming/>

O. James, « Derrière le tandem Airbus/Renault, le pari de batteries électriques de nouvelle génération », *L'usine nouvelle*, Novembre 2022

Disponible sur : <https://www.usinenouvelle.com/editorial/derriere-le-tandem-airbus-renault-le-pari-de-batteries-electriques-de-nouvelle-generation.N2072916>

M. Johnson, « Taxis volants : un rêve réalisable ? », *L'actualité*, Octobre 2021

Disponible sur : <https://lactualite.com/techno/taxis-volants-un-reve-realisable/>

« Bande passante : définition, traduction et acteurs », *Journal du Net*, Janvier 2019

Disponible sur : <https://www.journaldunet.fr/web-tech/dictionnaire-du-webmastering/1203431-bande-passante-definition-traduction-et-acteurs/>

McKinsey & Company, « The futur of air mobility: Electric aircraft and flying taxis »

Disponible sur : <https://www.mckinsey.com/featured-insights/the-next-normal/air-taxis>

V. Lamigeon, « CityAirbus NextGen : que vaut le taxi volant d’Airbus ? », Challenges, Septembre 2021
Disponible sur : https://www.challenges.fr/entreprise/aeronautique/cityairbus-nextgen-que-vaut-le-taxi-volant-d-airbus_781514

Ministère de la transition écologique et de la cohésion des territoires, « Agence de l’innovation pour les transports »

Disponible sur : <https://www.ecologie.gouv.fr/agence-innovation-transports>

C. Mircea, « Skyports plans to build vertiports for electric air taxis in Los Angeles », Autoevolution, Novembre 2021

Disponible sur : <https://www.autoevolution.com/news/skyports-plans-to-build-vertiports-for-electric-air-taxis-in-los-angeles-174493.html>

MK Partner, « L’eVTOL : L’avenir du transport aérien ? », Octobre 2022

Disponible sur : <https://www.mkpartnair.com/evtol-avenir-transport-aerien/>

O. Monod, « Crash avion, pour en finir avec l’erreur humaine », *L’Express*, 2015

Disponible sur : https://www.lexpress.fr/actualite/societe/fait-divers/crash-d-avion-pour-en-finir-avec-l-erreur-humaine_1664391.html

Le nouvel économiste, « Bienvenue au vertiport. Un nouveau type d’aérogare pour les taxis volants près de Paris », Novembre 2022

Disponible sur : <https://www.lenouveleconomiste.fr/bienvenue-au-vertiport-95932/>

J. Pappalardo, « The « MegaSkyport » is a fanciful future landing spot for Uber’s flying taxis », *Popular Mechanics*, Juillet 2018

Disponible sur : <https://www.popularmechanics.com/flight/a22454961/mega-skyport-uber-flying-taxi-vertiport/>

B. Polge, « DragonFly : Airbus teste une technologie de vol autonome inspirée de la libellule », *Les numériques*, Janvier 2023

Disponible sur : <https://www.lesnumeriques.com/pro/dragonfly-airbus-teste-une-technologie-de-vol-autonome-inspiree-de-la-libellule-n203419.html>

J. Reed, « Shareholders invest \$23 Million in Skyports for vertiports and drone services », *Aviation today*, Mars 2022

Disponible sur : <https://www.aviationtoday.com/2022/03/24/shareholders-invest-23-million-skyports-vertiports-drone-services/>

Redbran, « La technologie de batterie haute tension d’Airbus se prépare pour le test en vol EcoPulse et au-delà », *Techno-science.net*, Mars 2022

Disponible sur : <https://www.techno-science.net/actualite/technologie-batterie-haute-tension-airbus-se-prepare-test-vol-ecopulse-dela-N21826.html>

W. Remmerie, « eVTOLcertification interview with EASA », *AirShaper*, Avril 2023

Disponible sur : <https://airshaper.com/blog/evtol-certification-interview-with-easa>

W. Remmerie, « The role of CFD in passing aircraft EASAreulations », *AirShaper*, Mai 2023

Disponible sur : <https://airshaper.com/blog/cfd-in-passing-aircraft-easa-regulations#certifyingtodaysaircraft>

F. Soyez, « Où sont passés les tant promis drones de livraison ? », C Net France, Avril 2022

Disponible sur : <https://www.cnetfrance.fr/news/ou-sont-passees-les-tant-promis-drones-de-livraison-39940719.htm>

A. Standen et C. Collis, « SC-VTOL confirmed as basis for eVTOL certification in the UK », Lexology

Disponible sur : <https://www.lexology.com/library/detail.aspx?g=1f8c5595-4a98-4585-85ce-d64c9f747fb6>

E. Ukwandu, M. Ben Farah, H Hindy, M. Bures, R. Caddell Atkinson, C. Tachtatzis, X. Bellekens, « Cyber-security challenges in aviation industry: A review of current et futur trends », Juillet 2021

Urban Air Mobility News, « Paris Olympics 0224 eVTOL ticket prices « could be around EUR 110 » », Mai 2023

Disponible sur : <https://www.urbanairmobilitynews.com/air-taxis/paris-olympic-2024-evtol-ticket-prices-could-be-around-eur-110/>

G. Warwick, « FAA releases first eVTOL certification basis for comment », *Aviation Week Network*, Novembre 2022

Disponible sur : <https://aviationweek.com/air-transport/faa-releases-first-evtol-certification-basis-comment>

H. Yoo, « S. Korean companies join hands to build vertiports at gas stations », *The Korean Herald*, Mai 2022

Disponible sur : <https://www.koreaherald.com/view.php?ud=20220511000685>

III. Rapports publics

Groupe ADP, « La région Ile-de-France, Choose Paris Region, le Groupe ADP et le Groupe RATP lancent les premières expérimentations dédiées aux nouvelles mobilités aériennes urbaines sur l'aérodrome de Pontoise », *Communiqué de presse*, Novembre 2021

Groupe ADP, « Inauguration du premier vertiport intégré à Pontoise, épicerie des nouvelles mobilités aériennes durable en Europe », *Communiqué de presse*, Novembre 2022

Airbus et Boeing, « A new digital era of aviation: The path forward for airspace and traffic management »

ATEC, « The ATEC Journal », *Aviation Technician Education Council*, Volume 42, 2020

B. Lascara, A. Lacher, M. DeGarmo, D. Maroney, R. Niles, L. Vempati, « Urban air mobility Airspace integration concepts », Juin 2019

G. Scalabrin, W. Negm, P. Brier, C. Bataille, F. Bonicel, N. Camara, J-L. Chabaudie, C. Chouard, I. Ezquerra, A. Maartinez Fernandez, S. Garg, V. Ji, L. Labracherie, H. Javier Calderon Luchini, S. Pal, D. Pappas, M. Rodriguez, T. Taylor, D. Tortochaux, M. Arjona Villanueva, « En route to urban air mobility », publié par *Capgemini Engineering*, 2022

W. Qu, X. Tan, A. Tang, H. He, X. Liao, « Preliminary Concept of Urban Air Mobility Traffic Rules », *Drones* 2023, 7, 54, Janvier 2023

EASA, « Study on the societal acceptance of Urban Air Mobility in Europe », Mai 2021

EASA, infographie « What is UAM »

Disponible sur : https://www.easa.europa.eu/sites/default/files/dfu/infographic_1_-_what_is_uam_download.pdf

Métropole de Toulouse, « Francazal, un campus des mobilités innovantes et décarbonées »

Ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires, « L'organisation de la mobilité en France », Juin 2021

Disponible sur : <https://www.ecologie.gouv.fr/lorganisation-mobilite-en-france>

Territoire d'innovation, « VILAGIL »

Disponible sur : <https://www.banquedesterritoires.fr/sites/default/files/2020-11/Toulouse%2C%20Vilagil%20%28Occitanie%29.pdf>

IV. Sites internet

AIRBUS

Disponible sur : <https://www.airbus.com/en>

EASA

Disponible sur : <https://www.easa.europa.eu/en>

European Rotors

Disponible sur : <https://www.europeanrotors.eu/en>

L'avionnaire, « Normes de certification »

Disponible sur : <https://www.lavionnaire.fr/NormesIntro.php>

MAGiCALL

Disponible sur : <https://www.magicall.biz>

Observatoire National Interministériel de la Sécurité Routière (ONISR)

Disponible sur : <https://www.onisr.securite-routiere.gouv.fr/>

PopulationStat

Disponible sur : <https://populationstat.com>

Saft

Disponible sur : <https://www.saft.com/fr>

SESAR JU

Disponible sur : <https://www.sesarju.eu/projects/Uspace4UAM>

Skyports

Disponible sur : <https://skyports.net/>

VELCO, « Mobilité urbaine : la définition »,

Disponible sur : <https://velco.tech/fr/mobilite-urbaine-definition/>

V. Vidéo

Aeronewstv, « Livraison de colis en France, une deuxième ligne ouverte »

Disponible sur : https://youtu.be/JA8_GRm-3w

EASA, « U-Space concept – iConspicuity for GA & Rotorcraft in U-Space and beyond »

Disponible sur : <https://youtu.be/ITXb3uBwbZk>

EASA, « ADS-L – iConspicuity for GA & Rotorcraft in U-Space and beyond »

Disponible sur : <https://youtu.be/EAK6E2eRmhg>

EASA, « Electric and Hybrid propulsion system certification – EASA Rotorcraft & VTOL Symposium 2019 »

Disponible sur : https://youtu.be/z0InsV_X5Yo

EASA, « EVTOL Propulsion system safety – EASA Rotorcraft & VTOL Symposium 2019 »

Disponible sur : <https://youtu.be/H7ZZ75pwoK4>

EASA, « Pilot training – Rotorcraft & VTOL Symposium 2021 »

Disponible sur : <https://youtu.be/1wcCySvhWEw>

EASA, « VTOL trajectories and vertiports – Rotorcraft & VTOL Symposium 2021 »

Disponible sur : https://youtu.be/e_fsxgWIENI

EASA, « EASA AI Roadmap update – Rotorcraft & VTOL Symposium 2021 »

Disponible sur : <https://youtu.be/iUocZH-fvfk>

EASA, « iConspicuity and U-space airspace – Rotorcraft & VTOL Symposium 2021 »

Disponible sur : <https://youtu.be/9qljv1pnkis>

EASA, « EASA Update 2022 – Drones, eVTOL and rotorcraft – Rotorcraft & VTOL Symposium 2022 », Février 2023

Disponible sur : <https://youtu.be/KnuiGJ5zIMQ>

EASA, « Why changes in aviation safety are needed & other benefits – Rotorcraft & VTOL Symposium 2022 », Février 2023

Disponible sur : <https://youtu.be/PbD2KoKiyWA>

EASA, « FAA certification strategy for eVTOL – Rotorcraft & VTOL Symposium 2022 », Février 2023

Disponible sur : https://youtu.be/LjO_oOXmkCE

EASA, « Vertiport – VTOL technical requirements », Mai 2023

Disponible sur : <https://youtu.be/UT0yXLM2Z24>

eVTOL Innovation, « The reason why electric VTOL are more efficient than electric vehicles »

Disponible sur : <https://youtu.be/9Ummywv8up4>

Ouest-France, « Royaume-Uni : un « vertiport » inédit pour drones et taxis volants donne un aperçu du futur », Avril 2022

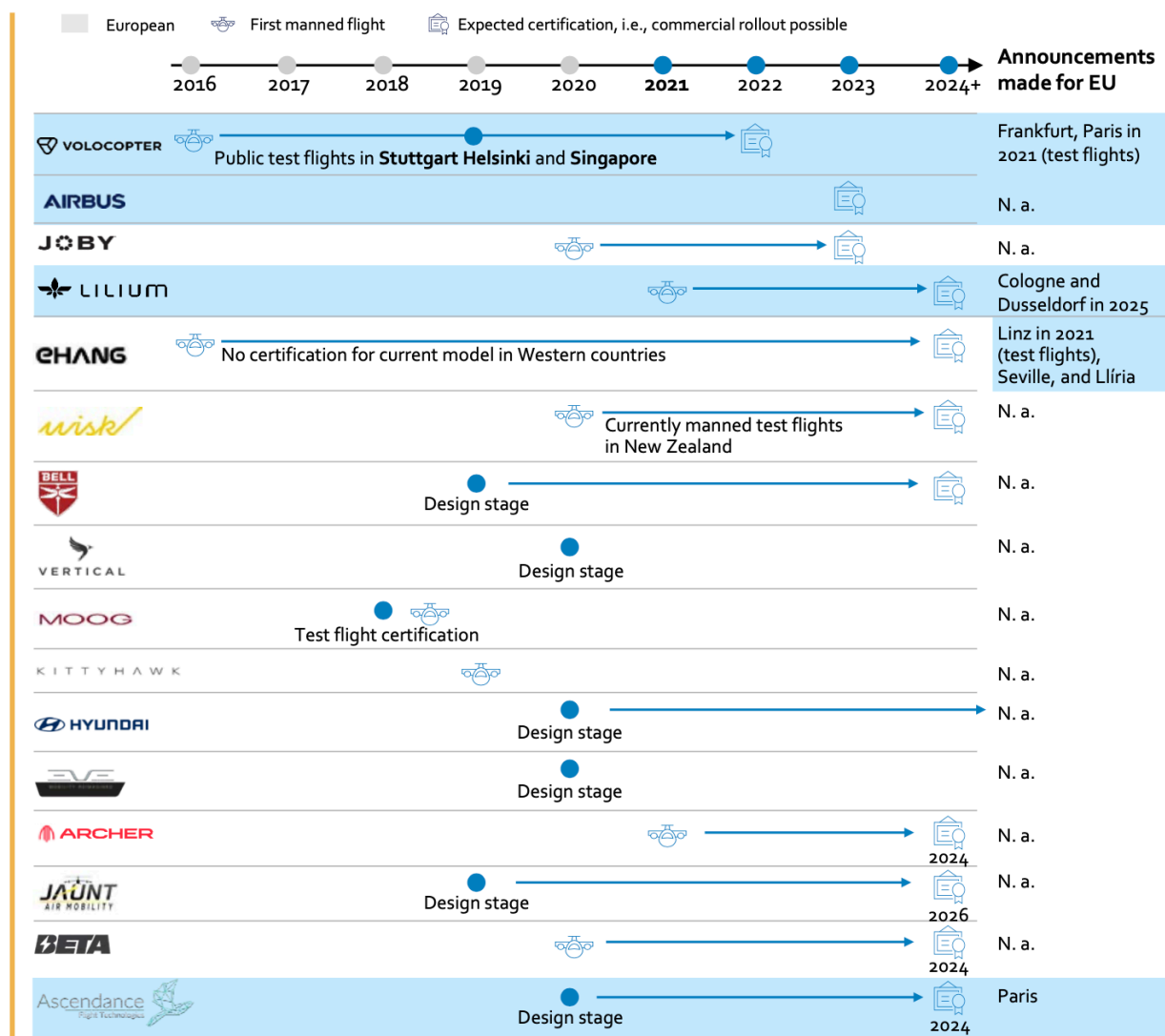
Disponible sur : <https://youtu.be/YY8V1wRpzwI>

VI. Événements

Tables rondes, « Le futur du transport aérien », *Cap sur l'Avenir*, Avril 2023 à l'aéroclub de France

ANNEXES

Figure 1 : Calendrier prévisionnel de certification d'eVTOL prévus pour le transport de passager



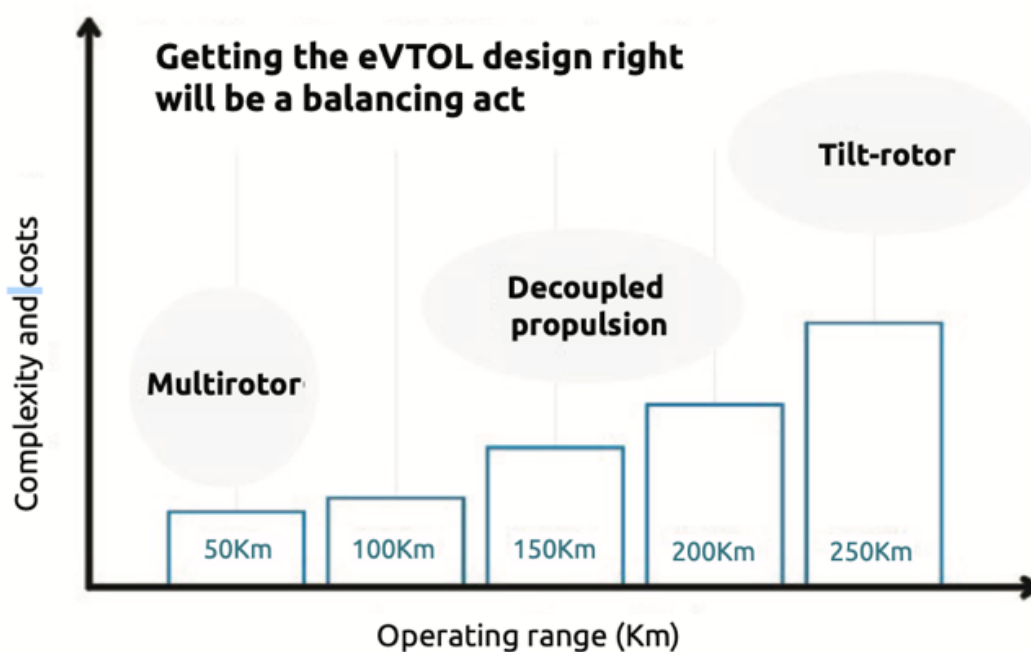
Source : EASA, « Study on the societal acceptance of Urban Air Mobility in Europe », Mai 2021, Page 21

Figure 2 : Perception du spectre de l'AAM vis-à-vis de l'UAM selon plusieurs organismes

Included scope in AAM and UAM definitions		 No explicit mention  Explicit mention					
		Use cases			Geographic reach		
		Passenger	Cargo	Operations	Urban	Regional	Interregional
AAM	FAA						
	NASA						
	NASA						
	Deakin Uni.						
UAM	NASA						
	SESAR JU						
	FAA						
	Deakin Uni.						
	Jonkoping Uni.						
	MITRE Corp						
	UC Berkley						
	TU Munich						

Source : EASA, « Study on the societal acceptance of Urban Air Mobility in Europe », Mai 2021, Page 9

Figure 3 : Rapport autonomie-coût pour chaque mode de propulsion



Source : G. Scalabrin, W. Negm, P. Brier, C. Bataille, F. Bonicel, N. Camara, J-L. Chabaudie, C. Chouard, I. Ezquerra, A. Maartinez Fernandez, S. Garg, V. Ji, L. Labracherie, H. Javier Calderon Luchini, S. Pal, D. Pappas, M. Rodriguez, T. Taylor, D. Tortochaux, M. Arjona Villanueva, « En route to urban air mobility », publié par *Capgemini Engineering*, 2022, Page 11

Figure 4 : Schéma d'aéronef multi-rotor



Source : G. Scalabrin, W. Negm, P. Brier, C. Bataille, F. Bonicel, N. Camara, J-L. Chabaudie, C. Chouard, I. Ezquerra, A. Maartinez Fernandez, S. Garg, V. Ji, L. Labracherie, H. Javier Calderon Luchini, S. Pal, D. Pappas, M. Rodriguez, T. Taylor, D. Tortochaux, M. Arjona Villanueva, « En route to urban air mobility », publié par *Capgemini Engineering*, 2022, Page 10

Figure 4a : Exemples d'aéronef multi-rotor (modèles Ehang 184 et Volocity)

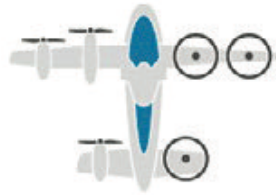


Sources : Ehang



Source : Volocopter

Figure 5 : Schéma d'aéronef à rotor basculant



Source : G. Scalabrin, W. Negm, P. Brier, C. Bataille, F. Bonicel, N. Camara, J-L. Chabaudie, C. Chouard, I. Ezquerra, A. Maartinez Fernandez, S. Garg, V. Ji, L. Labracherie, H. Javier Calderon Luchini, S. Pal, D. Pappas, M. Rodriguez, T. Taylor, D. Tortochaux, M. Arjona Villanueva, « En route to urban air mobility », publié par *Capgemini Engineering*, 2022, Page 10

Figure 5b : Exemples d'eVTOL à rotor basculant (Lilium Jet et Joby S4)



Source : Lilium Jet



Source : Joby Aviation

Figure 6 : Schéma d'aéronef à propulsion découplée



Source : G. Scalabrin, W. Negm, P. Brier, C. Bataille, F. Bonicel, N. Camara, J-L. Chabaudie, C. Chouard, I. Ezquerra, A. Maartinez Fernandez, S. Garg, V. Ji, L. Labracherie, H. Javier Calderon Luchini, S. Pal, D. Pappas, M. Rodriguez, T. Taylor, D. Tortochaux, M. Arjona Villanueva, « En route to urban air mobility », publié par *Capgemini Engineering*, 2022, Page 10

Figure 6c : exemple d'eVTOL à propulsion découplée (Aurora Flight Sciences et Kitty Hawk Cora)



Source : Aurora Flight Sciences



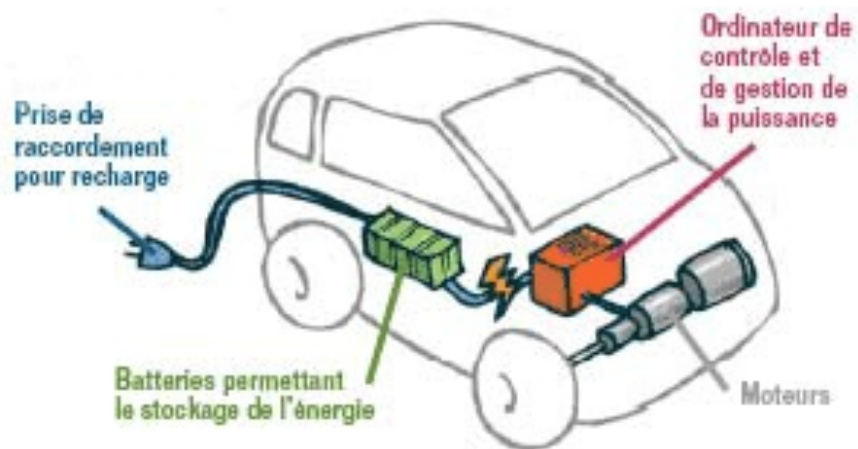
Source : Kitty Hawk

Figure 7 : Performances des appareils E-hang 184, Kitty Hawk Cora et Lilium Jet pour trois missions de référence.

	E-Hang 184	Kitty Hawk Cora	Lilium
7 km urban mission time	4.9 min	3.3 min	2.8 min
7 km urban mission energy	3.0 kWh	7.1 kWh	5.7 kWh
30 km extra-urban mission time	18.7 min	10.9 min	8.2 min
30 km extra-urban mission energy	10.9 kWh	15.2 kWh	8.3 kWh
100 km long-range mission time	-	34.3 min	24.9 min
100 km long-range mission energy	-	39.7 kWh	16.1 kWh

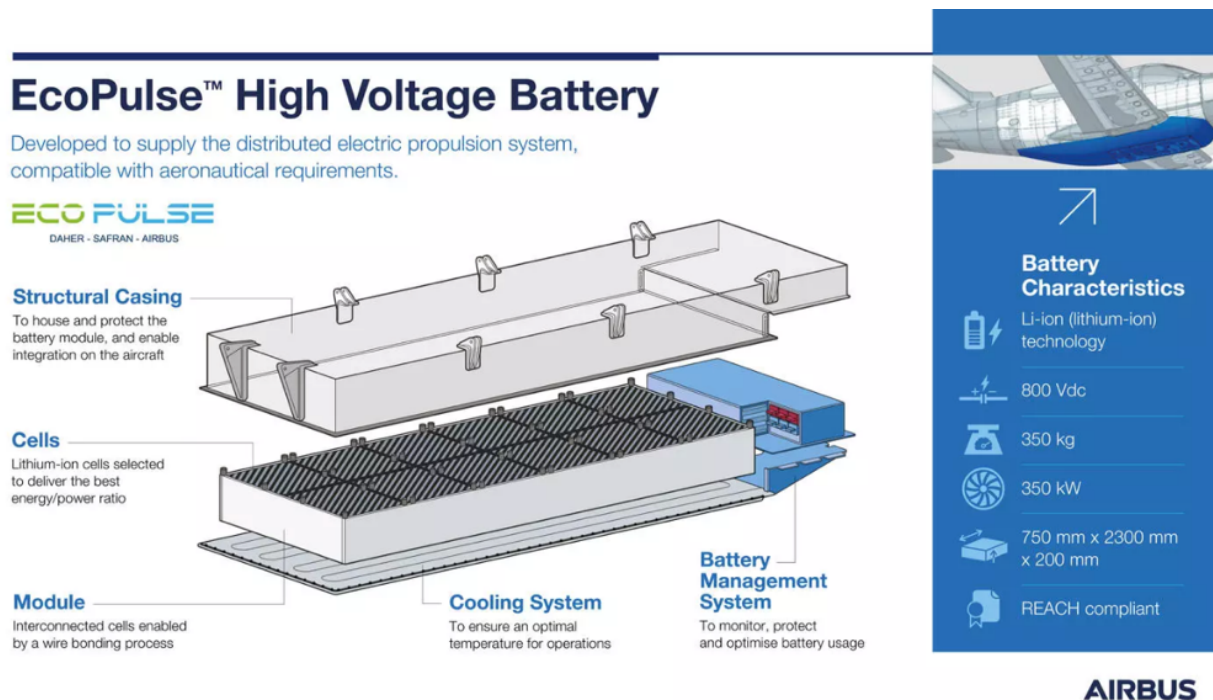
Source : A. BACCHINI et E. CESTINO, « Electric VTOL Configurations Comparision », Aerospace 6 n°3.26, Février 2019

Figure 8 : Schémas synthétique d'une voiture électrique



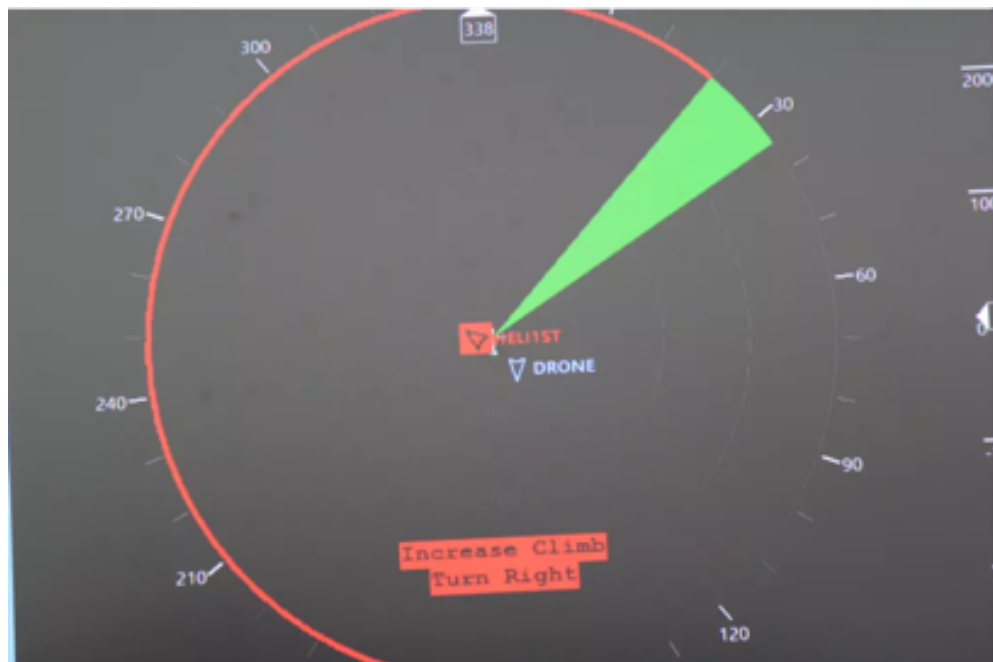
Source : Csuweb, « Voitures électriques : Principe de fonctionnement »

Figure 9 : Caractéristiques de la batterie EcoPulse



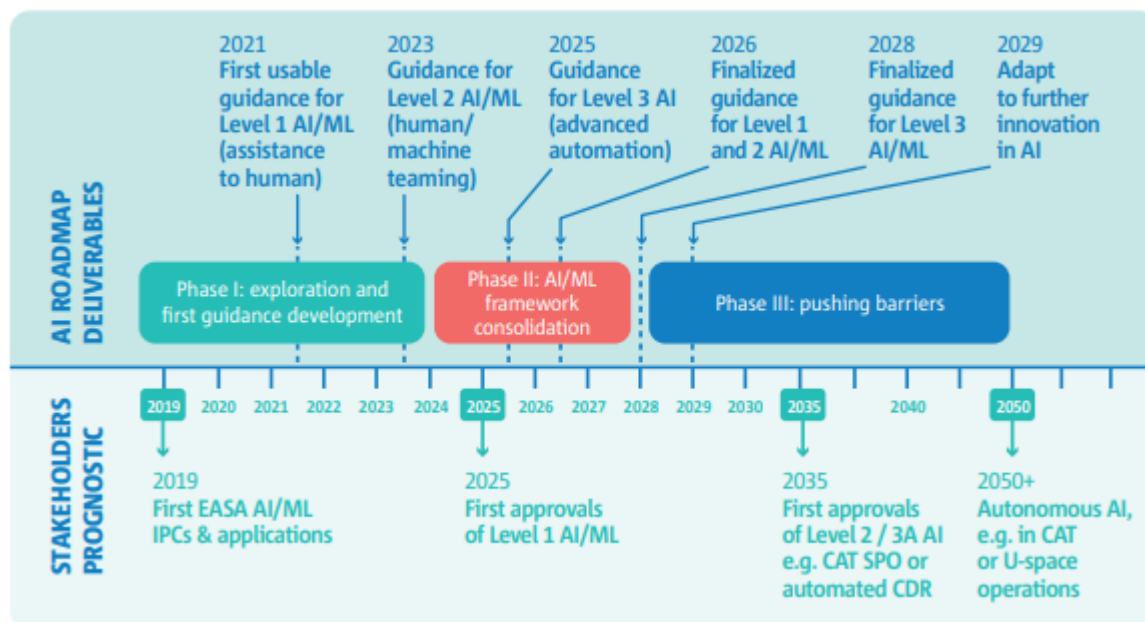
Source : Airbus, « Airbus high-voltage battery technology prepares for Ecopulse flight test and beyond », Mars 2022

Figure 10 : Système de détection et d'évitement de collision développé par Thales



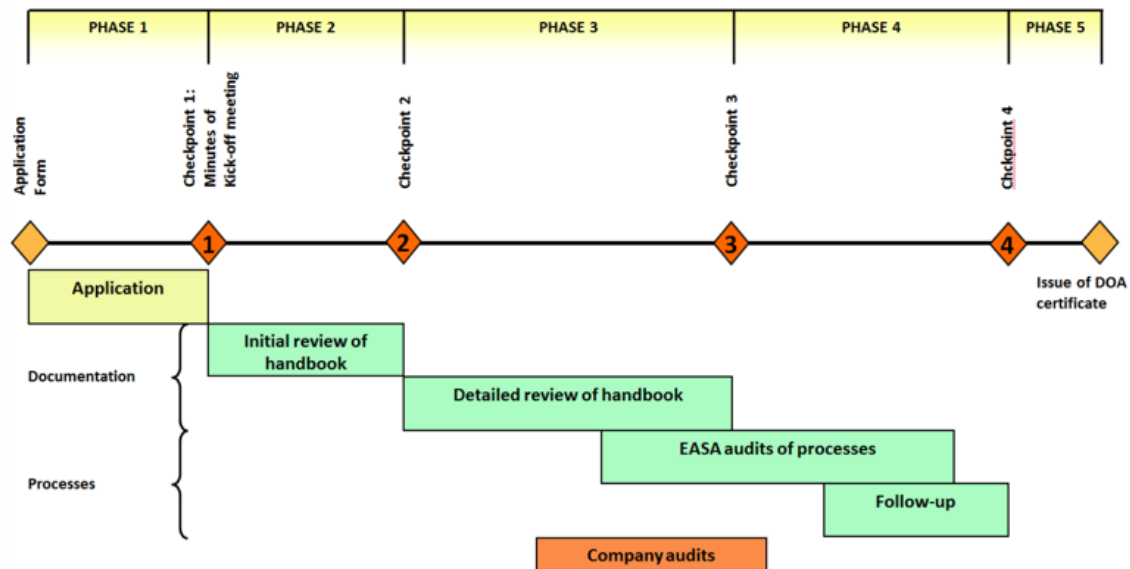
Source : J. El Hassani, « Faire voler des VTOL d'ici 2024, un défi (trop ?) olympique pour ADP et RATP », *Journal du Net*, Novembre 2021

Annexe 11 : Calendrier prévisionnel de l'EASA dans le cadre du déploiement de l'intelligence artificielle



Source : EASA, « Artificial intelligence roadmap 2.0, Human-centric approach to AI in aviation », Mai 2023, Page 27

Figure 12 : Processus d'obtention de l'agrément de DOA



Source : EASA, « Design Organisations Approvals »

Figure 13 : Chaîne d'étapes nécessaires à la certification d'un aéronaf



Source : Apluslaboratories, « Aerospace structural testing »

Annexe 14 : Extrait de l'article 21.17 du 14 C.F.R.

§ 21.17 Designation of applicable regulations.

14 CFR 21.17

1. (a) *Except as provided in §§ 25.2, 27.2, 29.2, and in parts 26, 34, and 36 of this subchapter, an applicant for a type certificate must show that the aircraft, aircraft engine, or propeller concerned meets—*
 1. (1) *The applicable requirements of this subchapter that are effective on the date of application for that certificate unless—*
 1. (i) *Otherwise specified by the FAA; or*
 2. (ii) *Compliance with later effective amendments is elected or required under this section; and*
 2. (2) *Any special conditions prescribed by the FAA.*
2. (b) *For special classes of aircraft, including the engines and propellers installed thereon (e.g., gliders, airships, and other nonconventional aircraft), for which airworthiness standards have not been issued under this subchapter, the applicable requirements will be the portions of those other airworthiness requirements contained in Parts 23, 25, 27, 29, 31, 33, and 35 found by the FAA to be appropriate for the aircraft and applicable to a specific type design, or such airworthiness criteria as the FAA may find provide an equivalent level of safety to those parts.*

Annexe 15 : Niveau de sécurité attendus pour les eVTOL en Europe

The table below provides the relationship between failure condition classifications and quantitative safety objectives/Function Development Assurance Levels (FDAL) for an aircraft with flight crew on board.

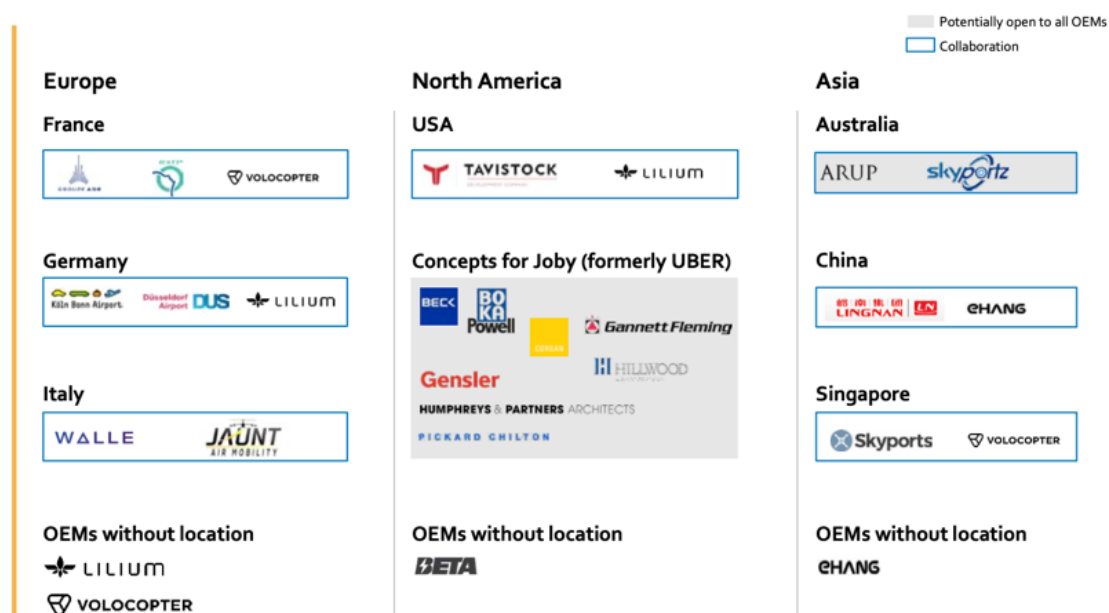
The safety objectives for each failure condition are:

	Maximum Passenger Seating Configuration	Failure Condition Classifications			
		Minor	Major	Hazardous	Catastrophic
Category Enhanced	-	$\leq 10^{-3}$ FDAL D	$\leq 10^{-5}$ FDAL C	$\leq 10^{-7}$ FDAL B	$\leq 10^{-9}$ FDAL A
Category Basic	7 to 9 passengers	$\leq 10^{-3}$ FDAL D	$\leq 10^{-5}$ FDAL C	$\leq 10^{-7}$ FDAL B	$\leq 10^{-9}$ FDAL A
	2 to 6 passengers (see note A)	$\leq 10^{-3}$ FDAL D	$\leq 10^{-5}$ FDAL C	$\leq 10^{-7}$ FDAL C	$\leq 10^{-8}$ FDAL B
	0 to 1 passenger (see note A)	$\leq 10^{-3}$ FDAL D	$\leq 10^{-5}$ FDAL C	$\leq 10^{-6}$ FDAL C	$\leq 10^{-7}$ FDAL C
[Quantitative safety objectives are expressed per flight hour]					

note A: No considerations of the system architecture for a DAL reduction are acceptable.

Source : Document n° SC-VTOL-01, « Special Condition Vertical Take-Off and Landing (VTOL) Aircraft », EASA, Juillet 2019

Figure 16 : Partenariats pour la construction de vertiports dans le monde



Source : EASA, « Study on the societal acceptance of Urban Air Mobility in Europe », Mai 2021, Page 25

Figure 17 : Présentation des infrastructures envisagées pour les eVTOL et leur nombre selon la taille des villes

Large cities			Medium cities		
Large, dense, high-income urban city, e.g., Paris, Berlin, Madrid, Hamburg, Vienna, Barcelona			Medium, less dense, medium income, urban/suburban city, Sevilla, Lisbon, Dusseldorf, Riga, Athens		
Outposts, areas of interest or private use	3-5	Vertipads 	3-5	Major suburban commuting stations, private use for high net worth individuals, or in wealthy suburbs	
Near concentrations of high origin and destination points	5-10	Vertibases 	3-7	Major corporate headquarters, major retail districts, and major commuting stations	
Major airports, city centres, and major commute corridors	2-3	Vertihubs 	1-2	Main airport, downtown, and major work district	
40-60			20-45		
Total landing pads					

Source : EASA, « Study on the societal acceptance of Urban Air Mobility in Europe », Mai 2021, Page 24

Figure 18 : Maquette du vertiport prévu pour le Quai d'Austerlitz à Paris



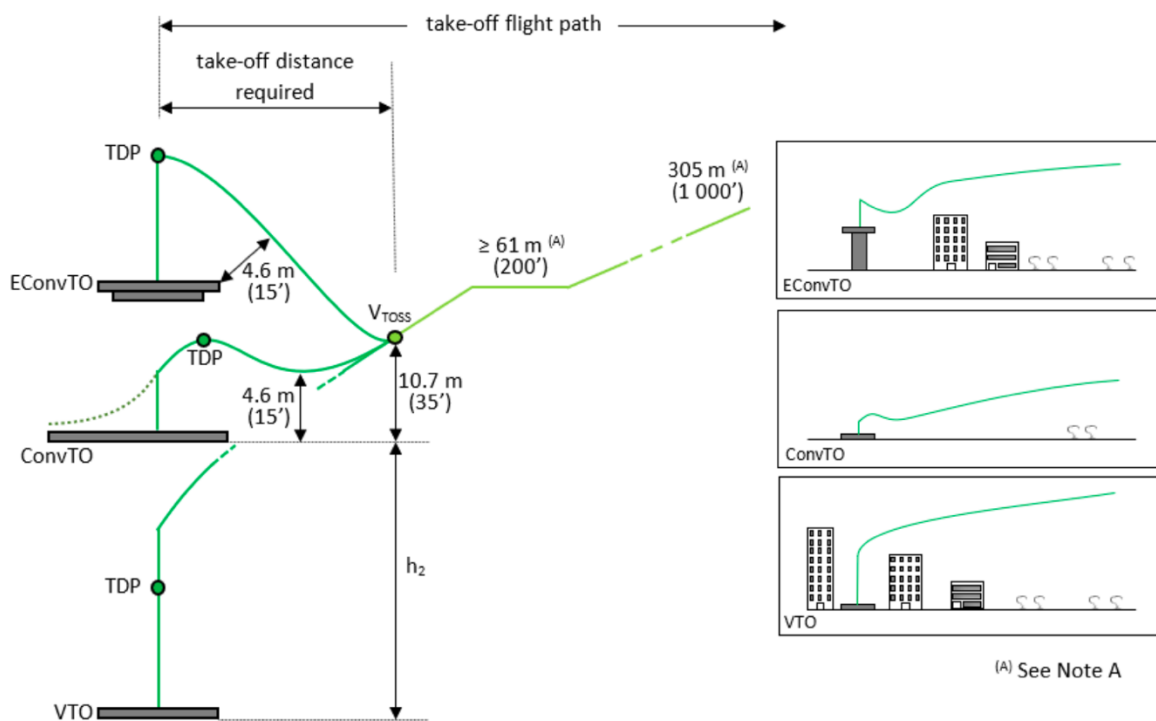
Source : Le nouvel économiste, « Bienvenue au vertiport. Un nouveau type d'aérogare pour les taxis volants près de Paris », Novembre 2022

Figure 19 : Concept de vertiport au-dessus d'une station-service



Source : H. Yoo, « S. Korean companies join hands to build vertiports at gas stations », *The Korean Herald*, Mai 2022

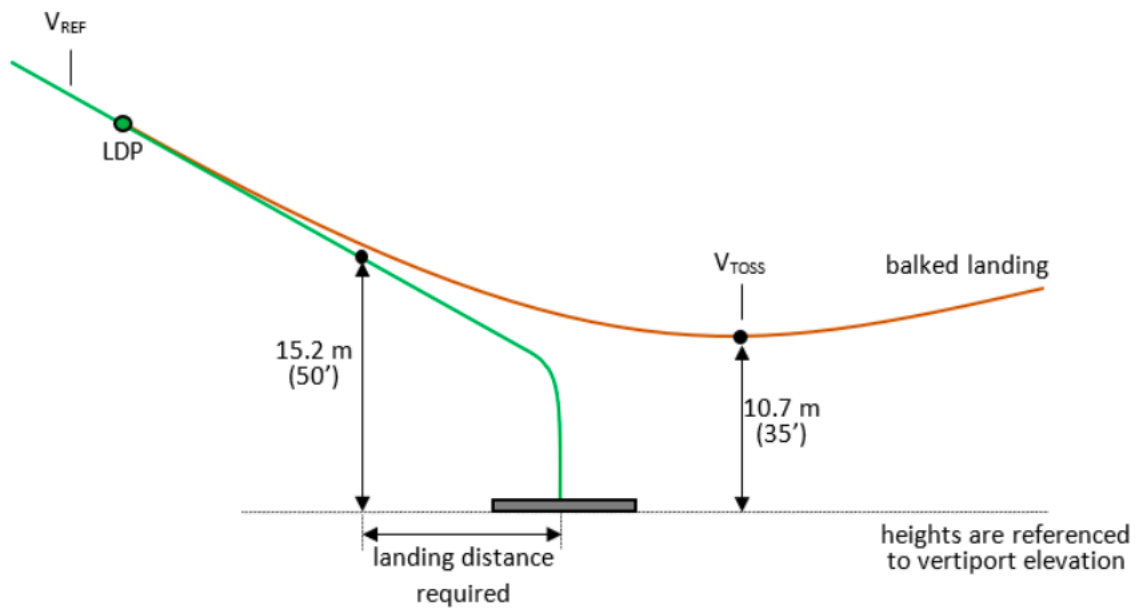
Figure 20 : Performances au décollage des eVTOL



Note A: The altitudes of 200 ft and 1 000 ft are proposed in the development of the take-off flight path as currently used for Category A helicopters. Different take-off heights can be considered if compatible with the departure and en-route structure; in particular, accelerating from V_{TOSS} to V_{FTO} at a higher altitude allows to leave the obstacle environment faster.

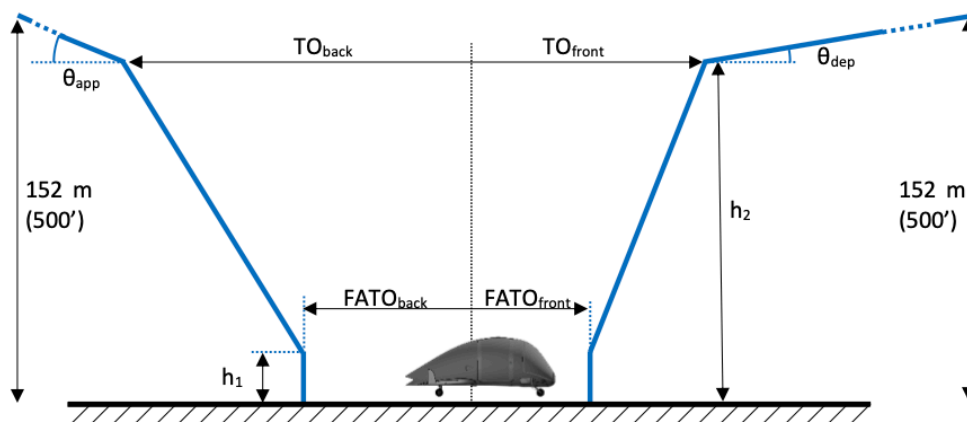
Source : EASA, « Prototype Technical Specification for the Design of VFR Vertiports for Operations with Manned VTOL-Capable Aircraft Certified in the Enhanced Category » (PTS-VPT-DSN), Mars 2022, Page 78

Figure 21 : Performances à l'atterrissage des eVTOL



Source : EASA, « Prototype Technical Specification for the Design of VFR Vertiports for Operations with Manned VTOL-Capable Aircraft Certified in the Enhanced Category » (PTS-VPT-DSN), Mars 2022, Page 79

Figure 22 : Espace libre d'obstacle dans le cadre du décollage et de l'atterrissage autour d'un vertiport



Parameter	Short description
h_1	Low hover height
h_2	High hover height
TO_{width}	Width at h_2
TO_{front}	Front distance at h_2
TO_{back}	Back distance at h_2
$FATO_{width}$	Width of the FATO
$FATO_{front}$	Front distance on FATO
$FATO_{back}$	Back distance on FATO
θ_{app}	Slope of approach surface
θ_{dep}	Slope of departure surface

Figure 22a : Exemple de Cologne



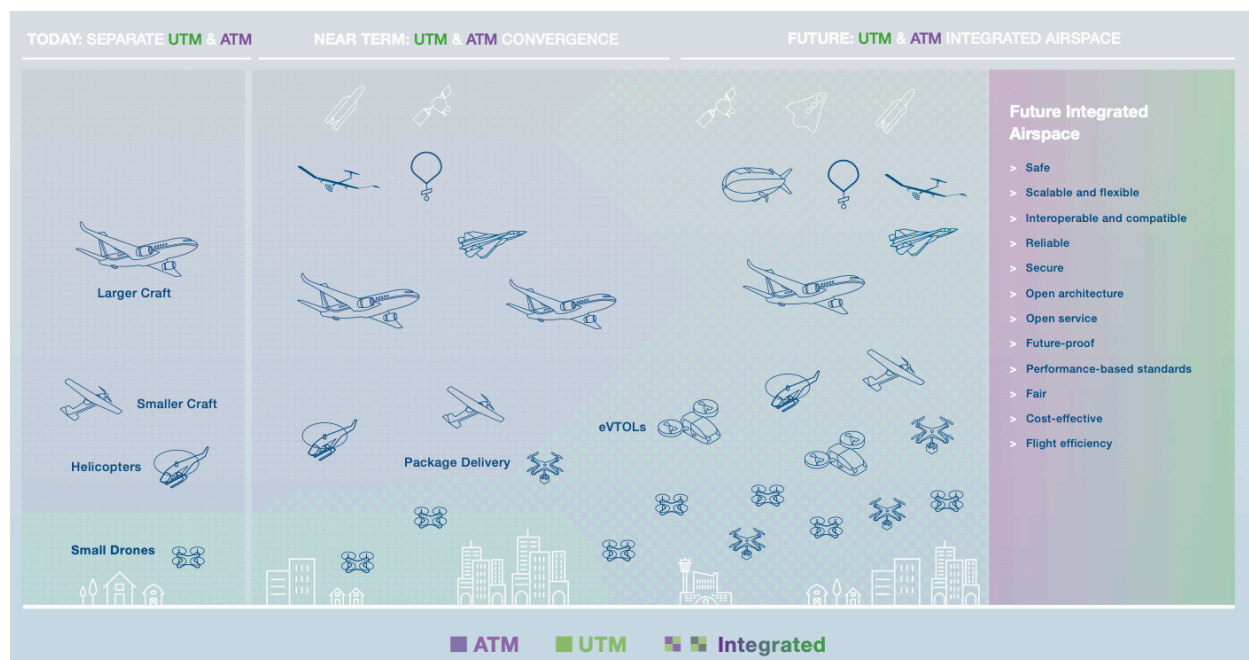
Source : EASA, « Prototype Technical Specification for the Design of VFR Vertiports for Operations with Manned VTOL-Capable Aircraft Certified in the Enhanced Category » (PTS-VPT-DSN), Mars 2022, Pages 63, 64 et 74

Figure 23 : Exemple d'une surface omnidirectionnelle sans obstacle avec un espace interdit d'accès



Source : EASA, « Prototype Technical Specification for the Design of VFR Vertiports for Operations with Manned VTOL-Capable Aircraft Certified in the Enhanced Category » (PTS-VPT-DSN), Mars 2022, Pages 72

Figure 24 : L'intégration de la gestion de trafic aérien et de la gestion du trafic urbain au sein d'un même ciel



Source : Airbus et Boeing, « A new digital era of aviation: The path forward for airspace and traffic management »

Annexe 25 : Extrait de l'annexe 11 (Air Traffic Services), Chapitre 2, Section 2.6 de l'OACI

2.6 Classification des espaces aériens

2.6.1 Les espaces aériens ATS seront classés et désignés comme suit :

Classe A. Seuls les vols IFR sont admis ; il est fourni un service de contrôle de la circulation aérienne à tous les vols et la séparation est assurée entre tous.

Classe B. Les vols IFR et VFR sont admis ; il est fourni un service de contrôle de la circulation aérienne à tous les vols et la séparation est assurée entre tous.

Classe C. Les vols IFR et VFR sont admis ; il est fourni un service de contrôle de la circulation aérienne à tous les vols et la séparation est assurée entre vols IFR et entre vols IFR et vols VFR. Les vols VFR sont séparés des vols IFR et reçoivent des informations de circulation relatives aux autres vols VFR.

Classe D. Les vols IFR et VFR sont admis, et il est fourni un service de contrôle de la circulation aérienne à tous les vols ; la séparation est assurée entre vols IFR et les vols IFR reçoivent des informations de circulation relatives aux vols VFR ; les vols VFR reçoivent des informations de circulation relatives à tous les autres vols.

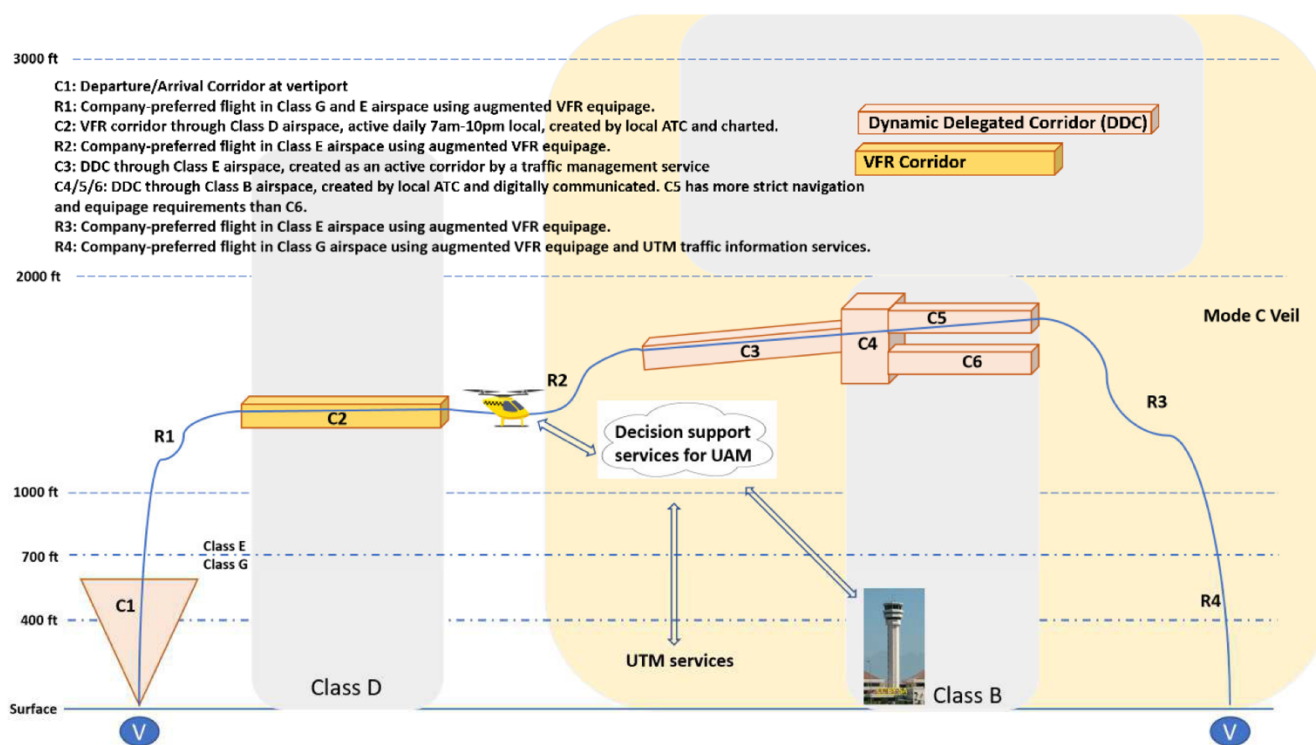
Classe E. Les vols IFR et VFR sont admis ; il est fourni un service de contrôle de la circulation aérienne aux vols IFR et la séparation est assurée entre vols IFR. Tous les vols reçoivent dans la mesure du possible des informations de circulation. La classe E ne sera pas utilisée pour les zones de contrôle.

Classe F. Les vols IFR et VFR sont admis ; tous les vols IFR participants bénéficient du service consultatif de la circulation aérienne, et tous les vols bénéficient du service d'information de vol s'ils le demandent.

Note.— Là où est mis en œuvre le service consultatif de la circulation aérienne, cela est considéré normalement comme une mesure temporaire seulement, en attendant qu'on puisse le remplacer par le service de contrôle de la circulation aérienne. [Voir aussi les PANS-ATM (Doc 4444), Chapitre 9.]

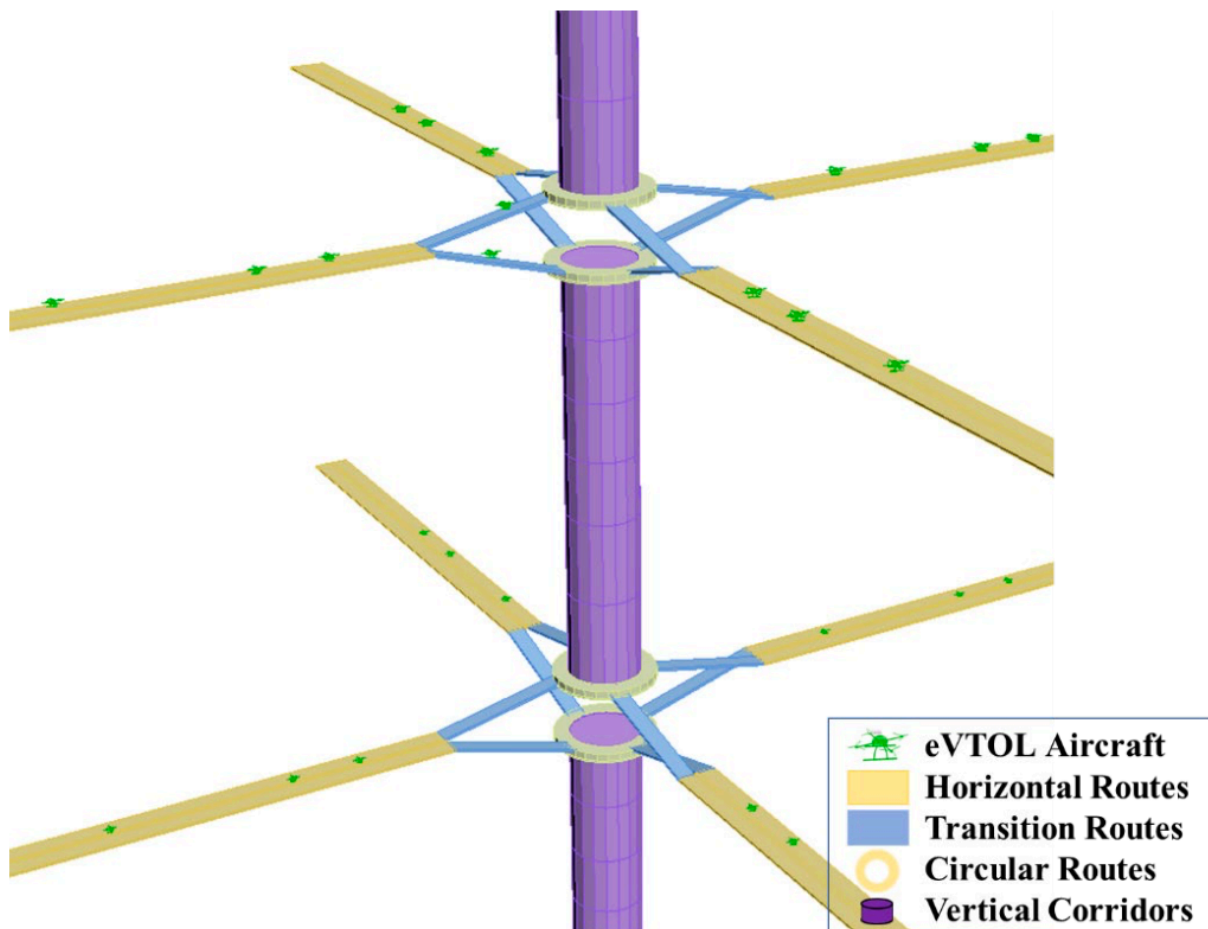
Classe G. Les vols IFR et VFR sont admis et bénéficient du service d'information de vol s'ils le demandent.

Figure 26 : Exemple d'intégration d'eVTOL dans l'espace aérien local



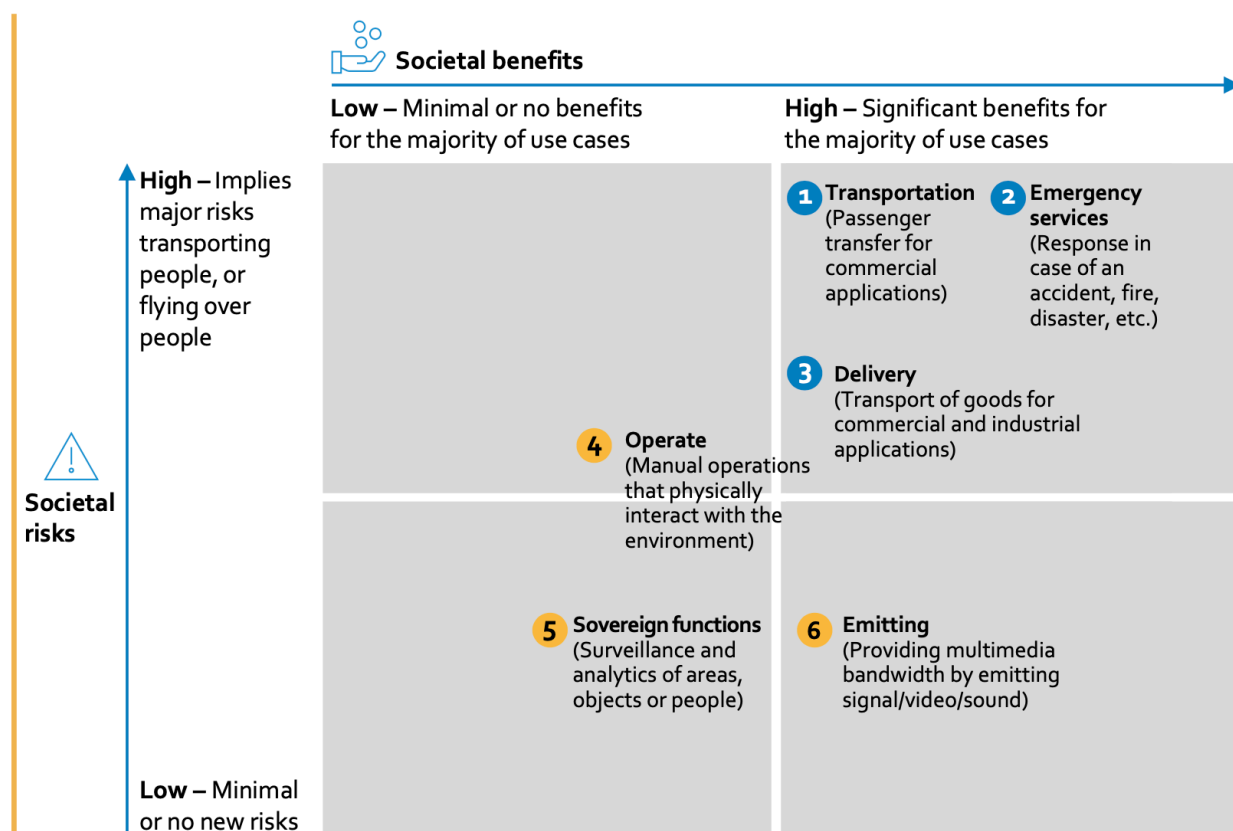
Source : B. Lascara, A. Lacher, M. DeGarmo, D. Maroney, R. Niles, L. Vempati, « Urban air mobility Airspace integration concepts », Juin 2019, Page 12

Figure 27 : Concept de couloirs aériens possible



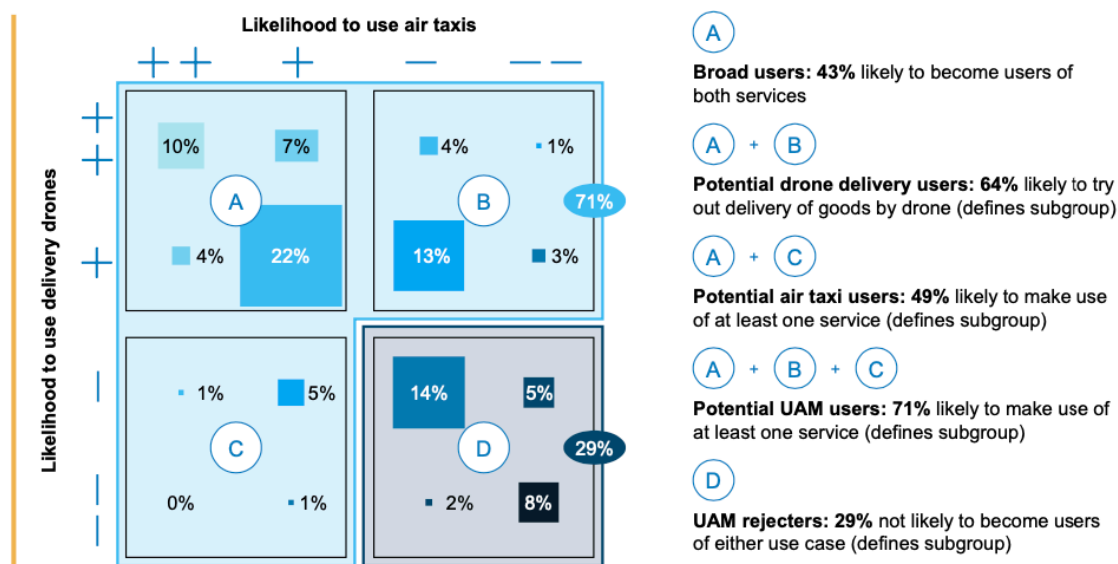
Source : W. Qu, X. Tan, A. Tang, H. He, X. Liao, « Preliminary Concept of Urban Air Mobility Traffic Rules », *Drones* 2023, 7, 54, Janvier 2023, Page 11

Figure 28 : Rapport bénéfice-risque pour différents usages des eVTOL



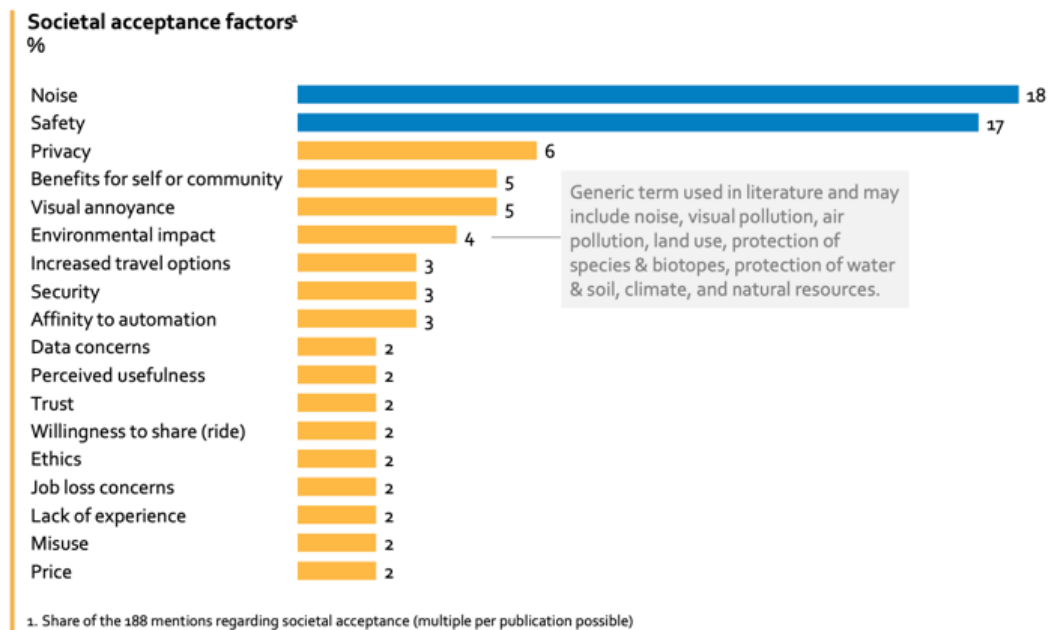
Source : EASA, « Study on the societal acceptance of Urban Air Mobility in Europe », Mai 2021, Page 37

Figure 29 : Résultat de l'attitude envers les eVTOL des personnes interrogées lors l'étude de l'EASA



Source : EASA, « Study on the societal acceptance of Urban Air Mobility in Europe », Mai 2021, Page

Figure 30 : Facteurs d'acceptation sociétale des eVTOL



Source : EASA, « Study on the societal acceptance of Urban Air Mobility in Europe », Mai 2021, Page 18

Annexe 31 : Niveau de bruit définis par l'EASA selon la masse des appareils

IM1 SUBPART D Maximum Allowable Noise Levels

Table 3 summarises the maximum allowable noise levels of the aircraft specified in Subpart D.

M = Maximum take-off mass in 1 000 kg	0	0.788	80.0
Take-off noise level (EPNdB)	86	$87.0314 + 9.9673 \log_{10} M$	106
Overflight noise level (EPNdB)	84	$85.0314 + 9.9673 \log_{10} M$	104
Approach noise level (EPNdB)	89	$90.0314 + 9.9673 \log_{10} M$	109

Table 3: maximum allowable noise levels of the aircraft as a function of MTOM

Source : EASA, « Consultation Paper: Environmental protection technical specification applicable to eVTOL powered by multiple, vertical, non-tilting, evenly distributed rotors », Mai 2023, Page 20

Table des matières

REMERCIEMENTS	5
SOMMAIRE	7
TABLE DES ABRÉVIATIONS.....	9
INTRODUCTION	11
I. Contexte	11
II. Définitions	14
III. Présentation du sujet	18
PARTIE 1 : LA TECHNOLOGIE EST-ELLE SUFFISAMMENT MATURE POUR PROPOSER UNE OFFRE DE MOBILITÉ AÉRIENNE URBAINE INTÉRESSANTE ?	21
TITRE 1 : DE NOUVEAUX SYSTÈMES DE PROPULSIONS	23
TITRE 2 : UNE NOUVELLE SOURCE D'ÉNERGIE	27
<i>Chapitre 1 : Les batteries pourront-elles être certifiées aisément ?</i>	<i>28</i>
<i>Chapitre 2 : Les batteries sont-elles suffisamment performantes pour offrir l'autonomie nécessaire aux opérations envisagées ?</i>	<i>31</i>
TITRE 3 : UNE AVIONIQUE DE POINTE	34
<i>Chapitre 1 : Les systèmes de commande de vol autonome</i>	<i>37</i>
<i>Chapitre 2 : Les systèmes de communication</i>	<i>41</i>
PARTIE 2 : LA RÉGLEMENTATION EST-ELLE ADAPTÉE POUR PERMETTRE LE DÉVELOPPEMENT DES TAXIS VOLANTS ?	45
TITRE 1 : A QUELLES CONDITIONS DOIVENT RÉPONDRE LES CONSTRUCTEURS ?	48
TITRE 2 : QUELLE EST LA RÉGLEMENTATION APPLICABLE POUR LA CERTIFICATION DES APPAREILS ?	49
<i>Chapitre 1 : Aux Etats-Unis.....</i>	<i>50</i>
<i>Chapitre 2 : En Europe</i>	<i>53</i>
TITRE 3 : L'OPÉRATEUR DEVRA-T-IL PRENDRE DES DISPOSITIONS PARTICULIÈRES ?	58
PARTIE 3 : L'INTÉGRATION DES EVTOL DANS LE PAYSAGE URBAIN EST-ELLE ENVISAGEABLE MALGRÉ LES CONTRAINTES AUXQUELLES ILS SONT CONFRONTÉS ?	63
TITRE 1 : LES INFRASTRUCTURES SONT-ELLES PRÊTES ET ADAPTÉES ?	64
<i>Chapitre 1 : A quelles normes doivent répondre les infrastructures ?</i>	<i>66</i>
<i>Chapitre 2 : Comment va-t-il être décidé des emplacements des vertiports ?</i>	<i>69</i>
Section 1 : Qui a la compétence pour choisir ?	69

Section 2 : Quels seront les critères ?	71
TITRE 2 : COMMENT LES CONTRÔLEURS AÉRIENS VONT-ILS ORGANISER LES FLUX DE NAVETTES AÉRIENNES EN ZONE URBAINE ?	74
<i>Chapitre 1 : Des procédures de décollage et d'atterrissage précises</i>	75
<i>Chapitre 2 : La gestion du trafic aérien En-route</i>	77
TITRE 3 : LES HABITANTS DES DIFFÉRENTES MÉTROPOLES SONT-ILS PRÊTS À ACCEPTER CE TYPE DE MOBILITÉ ?	80
<i>Chapitre 1 : Les nuisances sonores, visuelles et vibratoires</i>	83
<i>Chapitre 2 : L'impact environnemental</i>	85
<i>Chapitre 3 : L'impact économique</i>	86
CONCLUSION	91
BIBLIOGRAPHIE	93
I. Textes réglementaire	93
II. Articles	94
III. Rapports publics	98
IV. Sites internet	99
V. Vidéo	100
VI. Événements	101
ANNEXES	103
Figure 1 : Calendrier prévisionnel de certification d'eVTOL prévus pour le transport de passager	103
Figure 2 : Perception du spectre de l'AAM vis-à-vis de l'UAM selon plusieurs organismes	104
Figure 3 : Rapport autonomie-coût pour chaque mode de propulsion	105
Figure 4 : Schéma d'aéronef multi-rotor	106
Figure 4a : Exemples d'aéronef multi-rotor (modèles Ehang 184 et Volocity)	106
Figure 5 : Schéma d'aéronef à rotor basculant	107
Figure 5b : Exemples d'eVTOL à rotor basculant (Lilium Jet et Joby S4)	107
Figure 6 : Schéma d'aéronef à propulsion découplée	108
Figure 6c : exemple d'eVTOL à propulsion découplée (Aurora Flight Sciences et Kitty Hawk Cora)	108
Figure 7 : Performances des appareils E-hang 184, Kitty Hawk Cora et Lilium Jet pour trois missions de référence.	109
Figure 8 : Schémas synthétique d'une voiture électrique	110
Figure 9 : Caractéristiques de la batterie EcoPulse	111
Figure 10 : Système de détection et d'évitement de collision développé par Thales	112
Annexe 11 : Calendrier prévisionnel de l'EASA dans le cadre du déploiement de l'intelligence artificielle	113
Figure 12 : Processus d'obtention de l'agrément de DOA	114
Figure 13 : Chaîne d'étapes nécessaires à la certification d'un aéronef	115
Annexe 14 : Extrait de l'article 21.17 du 14 C.F.R.	116
Annexe 15 : Niveau de sécurité attendus pour les eVTOL en Europe	117

Figure 16 : Partenariats pour la construction de vertiports dans le monde	118
Figure 17 : Présentation des infrastructures envisagées pour les eVTOL et leur nombre selon la taille des villes .	119
Figure 18 : Maquette du vertiport prévu pour le Quai d'Austerlitz à Paris	120
Figure 19 : Concept de vertiport au-dessus d'une station-service	121
Figure 20 : Performances au décollage des eVTOL	122
Figure 21 : Performances à l'atterrissage des eVTOL.....	123
Figure 22 : Espace libre d'obstacle dans le cadre du décollage et de l'atterrissage autour d'un vertiport.....	124
Figure 22a : Exemple de Cologne	124
Figure 23 : Exemple d'une surface omnidirectionnelle sans obstacle avec un espace interdit d'accès	125
Figure 24 : L'intégration de la gestion de trafic aérien et de la gestion du trafic urbain au sein d'un même ciel ...	126
Annexe 25 : Extrait de l'annexe 11 (Air Traffic Services), Chapitre 2, Section 2.6 de l'OACI.....	127
Figure 26 : Exemple d'intégration d'eVTOL dans l'espace aérien local.....	128
Figure 27 : Concept de couloirs aériens possible	129
Figure 28 : Rapport bénéfice-risque pour différents usages des eVTOL.....	130
Figure 29 : Résultat de l'attitude envers les eVTOL des personnes interrogées lors l'étude de l'EASA.....	131
Figure 30 : Facteurs d'acceptation sociétale des eVTOL.....	132
Annexe 31 : Niveau de bruit définis par l'EASA selon la masse des appareils	133
TABLE DES MATIÈRES	135

RESUME

La mobilité urbaine aérienne pourrait répondre à des problématiques de désenclavement des territoires. Les grandes métropoles mondiales s'intéressent aux innovations développées ces dernières années. Or, les eVTOL sont nouveaux et font face à une réglementation encore incomplète, à des problématiques d'infrastructures et d'acceptation sociétale. Nous cherchons, à travers ce mémoire, à répondre aux questions liées au déploiement des taxis aériens.

SUMMARY

Urban air mobility could respond to the problems of opening up territories. The major world cities are interested in the innovations developed in recent years. However, eVTOLs are new and face still incomplete regulations, infrastructure and societal acceptance issues. We seek to answer questions related to the deployment of air taxis.

MOTS CLES

Mobilité aérienne urbaine ; Mobilité aérienne avancée ; Aéronef à décollage et atterrissage vertical ; Taxi aérien ; Électrique ; Acceptabilité sociétale ; Trafic aérien urbain ; Technologie ; Batterie ; Vols autonomes ; Certification ; AESA ; FAA ; Rotor basculant ; Vertiport

KEYWORDS

Urban air mobility ; Advanced air mobility ; Vertical take-off and landing ; VTOL ; Electric ; Societal acceptability ; Urban traffic management UTM ; Technology ; Battery ; Autonomous flights ; Certifications ; EASA ; FAA ; Tilt-rotor ; Vertiport