

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À
L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

COMME EXIGENCE PARTIELLE
DE LA MAÎTRISE EN GESTION DE PROJET

PAR
DREYFUS SIQUEIRA SILVA

SÃO PAULO (BRÉSIL) - ÉTUDE DE CAS POUR UNE APPLICATION UAM
INITIALE AVEC VTOL ÉLECTRIQUE

DECEMBRE 2018

Université du Québec à Trois-Rivières

Service de la bibliothèque

Avertissement

L'auteur de ce mémoire ou de cette thèse a autorisé l'Université du Québec à Trois-Rivières à diffuser, à des fins non lucratives, une copie de son mémoire ou de sa thèse.

Cette diffusion n'entraîne pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits de propriété intellectuelle, incluant le droit d'auteur, sur ce mémoire ou cette thèse. Notamment, la reproduction ou la publication de la totalité ou d'une partie importante de ce mémoire ou de cette thèse requiert son autorisation.

Université du Québec à Trois-Rivières

Service de la bibliothèque

Avertissement

L'auteur de ce mémoire ou de cette thèse a autorisé l'Université du Québec à Trois-Rivières à diffuser, à des fins non lucratives, une copie de son mémoire ou de sa thèse.

Cette diffusion n'entraîne pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits de propriété intellectuelle, incluant le droit d'auteur, sur ce mémoire ou cette thèse. Notamment, la reproduction ou la publication de la totalité ou d'une partie importante de ce mémoire ou de cette thèse requiert son autorisation.

SOMMAIRE

Les aéronefs à décollage et atterrissage verticaux (VTOL : Vertical Take-off and Landing) font l'objet de recherches depuis le début du 20^e siècle. Cependant, de nombreux défis technologiques ont ralenti le développement de ces aéronefs par rapport aux aéronefs à voilure fixe et ont limité leur utilisation à des applications spécifiques. Il existe plusieurs types d'aéronefs VTOL, et le plus populaire d'entre eux est l'hélicoptère. Les hélicoptères sont utilisés dans plusieurs types de missions, avec une grande souplesse, mais ils présentent des handicaps importants qui empêchent leur usage très répandu (tels que des opérations coûteuses, le bruit et la pollution).

Au début du 21^e siècle, le développement rapide de la propulsion électrique a donné naissance à l'aéronef VTOL électrique (eVTOL). Les aéronefs eVTOL utilisent la propulsion électrique distribuée (DEP: Distributed Electric Propulsion), ce qui les rend très bien adaptés à une utilisation au milieu urbain. La course au développement et à la certification d'aéronefs eVTOL pouvant desservir le marché de la mobilité aérienne urbaine (UAM : Urban Air Mobility) a débuté lorsque UBER a publié son célèbre article intitulé "Avance rapide vers un avenir du transport aérien urbain à la demande (Fast-Forwarding to a Future of On-Demand Urban Air Transportation)" en 2016. Cependant, plusieurs défis doivent être surmontés pour que l'eVTOL UAM devienne une réalité. Ce mémoire étudie la faisabilité d'eVTOL selon trois axes: technologie, réglementation et marché, et propose São Paulo (Brésil) comme ville idéale pour les tests et le lancement d'un

service pionnier UAM basé sur un aéronef eVTOL, en listant et en analysant ses caractéristiques. Comme il n'y a pas beaucoup de littérature scientifique analysant la faisabilité d'eVTOL, ce mémoire vise à contribuer à la compréhension de cette nouvelle technologie et à la manière dont elle peut contribuer au développement de la mobilité aérienne urbaine.

TABLE DE MATIÈRES

SOMMAIRE.....	iii
TABLE DE MATIÈRES	v
LISTE DE TABLEAUX.....	viii
LISTE DE FIGURES	ix
LISTE DES ABRÉVIATIONS.....	xii
LISTE DES ANNEXES.....	xv
REMERCIEMENTS	xvi
1. INTRODUCTION	1
1.1. Contexte	1
1.2. Problème général.....	3
1.3. Objet de l'étude et localisation	5
1.4. Objectif et questions de recherche.....	6
1.5. Périmètre	7
2. REVUE DE LITTÉRATURE	8
2.1. L'aéronef VTOL convertible (le convertiplane)	8
2.2. Le VTOL électrique	10
2.2.1. Propulsion électrique et DEP	11

2.2.2.	Contribution environnementale du eVTOL.....	12
2.2.2.1.	Pollution sonore.....	13
2.2.2.2.	Pollution de l'air	15
2.3.	Principaux concepts eVTOL en cours de développement	17
2.3.1.	Complexité de la conception	18
2.3.2.	Performance et bruit	23
2.4.	Principaux défis de la technologie eVTOL	27
2.4.1.	Certification de type	27
2.4.2.	Autres défis de la technologie eVTOL.....	32
2.5.	Le concept ODM/UAM, et comment il peut contribuer à atténuer les problèmes de circulation dans les grandes métropoles.....	34
2.6.	São Paulo et ses grands problèmes de trafic	40
2.7.	Les hélicoptères à São Paulo	45
2.8.	Expériences ODM/UAM actuels à São Paulo	48
2.9.	L'impact des hélicoptères dans l'environnement urbain...	53
2.10.	L'expérience pionnière de New York avec des hélicoptères au service de l'UAM	54
3.	METHODOLOGIE.....	60

3.1. Les villes idéales pour server de projets pilotes.....	60
4. RÉSULTATS ET DISCUSSIONS.....	63
4.1. São Paulo et la vision d'UBER pour une ville idéale pour la première application eVTOL.....	63
4.2. Autres considérations sur São Paulo en tant que projet pilote pour le service ODM/UAM.....	71
4.3. Proposition de la première opération ODM/UAM eVTOL à São Paulo.....	73
4.3.1. La décision entre ODM ou horaire fixe.....	74
4.3.2. La route.....	74
4.3.3. L'aéronef.....	76
4.4. Le niveau TRL actuel de la technologie eVTOL.....	78
5. CONCLUSIONS.....	81
5.1. Technologie.....	82
5.2. Réglementaire.....	85
5.3. Le marché.....	86
RÉFÉRENCES.....	89

LISTE DE TABLEAUX

Tableau 1. Nombre moyen d'heures de trafic dans les 10 villes les plus congestionnées au monde. (source: INRIX Global Traffic Scorecard, 2018).....	35
Tableau 2. Prix des ODM en hélicoptères et durées de voyages entre certains hélipads/hélidecks de VOOM à São Paulo (source VOOM).....	50
Tableau 3. Caractéristiques requises par UBER pour que la ville idéale reçoive les essais UBER Air eVTOL en 2020.....	62
Tableau 4. Principaux nœuds de développement régional autour de São Paulo, dans la RMSP et ses municipalités. (EMPLASA, 2018).....	64
Tableau 5. Niveaux TRL pour les produits aérospatiaux.....	80

LISTE DE FIGURES

Figure 1. Du FW61 au modernes VTOL	2
Figure 2. Localisation de l'étude.	6
Figure 3. Le Heliconair HC-1 convertiplane.	9
Figure 4. NASA GL10 Greased Lightning (hauts niveaux de DEP).	11
Figure 5. Éléments générateurs de bruit dans les hélicoptères classiques.....	14
Figure 6. Principaux types de conceptions eVTOL en cours de développement et comparaison qualitative de la complexité.	19
Figure 7. Ehang 184 multicopter.	20
Figure 8. Le Kitty-Hawk Cora Hybride Portance+Croisière.....	21
Figure 9. Le Joby S4 (rotors basculants).	22
Figure 10. Le Airbus A3 Vahana (voilure-rotor basculants).	22
Figure 11. Le Lilium Jet (vecteur de poussée).	23
Figure 12. Volocopter VC200 multicopter.....	25
Figure 13. Comparaison qualitative de l'efficacité stationnaire / croisière pour différents types de propulsion eVTOL.....	26
Figure 14. Certification d'eVTOL comme aéronef de classe spéciale.....	30
Figure 15. ODM/UAM occupe la troisième dimension de l'espace urbain, en allégeant le trafic au sol.	37
Figure 16. Concept d'application client ODM, fonctionnant sur un smartphone, montrant les phases sol et vol du voyage ODM (de A à B).	39

Figure 17. Concept d'opérations (CONOPS) pour un service ODM/UAM générique. Vue de profil, avec départ en A et arrivée en D.....	39
Figure 18. La RMSP, Mégapole du Brésil.	40
Figure 19. Centre-ville de São Paulo.	41
Figure 20. Hélicopads dans la région de Brooklin Paulista (9 hélicopads sont visibles dans la photo).	43
Figure 21. Route le plus rapide à l'heure de pointe de Brooklin Paulista à l'aéroport GRU. (google maps)	44
Figure 22. En jaune, l'espace aérien sous vigilance d'Helicontrol. En rouge, les routes spéciales pour hélicoptères (REH) au-dessus de la région de Brooklin Paulista.	47
Figure 23. Hélicopters/hélicopads de VOOM à São Paulo. La route principale est de Brooklin Paulista (São Paulo World Trade Center) à l'aéroport international de GRU. (adapté de google maps)	50
Figure 24. Étapes pour réserver un vol d'hélicoptère ODM avec VOOM à São Paulo.....	51
Figure 25. Confirmation d'un vol d'hélicoptère ODM avec VOOM à São Paulo.	52
Figure 26. L'accident du New York Airways vol 972t sur l'hélicopad sur le toit du bâtiment Pan Am	57
Figure 27. Prospectus de Trump Shuttle, de 1989, avec horaire de vol régulier.	58

Figure 28. Les principaux nœuds de développement régionaux sont géographiquement répartis dans RMSP, occupant une superficie considérable.	64
Figure 29. Station de train métropolitain Berrini, à Brooklin Paulista, partie du réseau de métro et de train métropolitain de São Paulo.	66
Figure 30. EMBRAER eVTOL en développement pour UBER Air (un modèle hybride portance+croisière relativement simple).....	73
Figure 31. Route WTC-GRU (en noir), REH Pinheiros->Marte->Ecológico (~47 km).....	76
Figure 32. Concepts eCRM d'UBER pour l'appareil initial eVTOL.....	78

LISTE DES ABRÉVIATIONS

Abréviation	Définition	Définition en Français
°C	Degrees Celsius	Degrés Celsius
ABRAPHE	Associação Brasileira de Pilotos de Helicóptero	Association Brésilienne de Pilotes d'Hélicoptère
AC	Advisory Circular	Circulaire d'information
ANAC	Agência Nacional de Aviação Civil	Agence Nationale de l'Aviation Civile
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica	Agence Nationale de l'Énergie Électrique
ASTM	American Society for Testing and Materials	Société Américaine d'Essais et de Matériaux
ATC	Air Traffic Control	Contrôle du Trafic Aérien
Avgas	Aviation Gasoline	Essence d'Aviation
BVI	Blade Vortex Interaction	Interaction Vortex Pale
CAD	Computer Aided Design	Conception Assistée par Ordinateur
CFR	Code of Federal Regulations	Code des Régulations Fédérales
CO ²	Carbon Dioxide	Gaz Carbonique
CONOPs	Concept of Operations	Concept d'Opérations
CRM	Comom Reference Model	Modèle de Référence Comom
CS	Certification Specifications	Spécifications de Certification
CTA	Centro Técnico Aeroespacial	Centre Technique Aérospatial
CTOL	Conventional Take-off and Landing	Décollage et Atterrissage Conventionnels
dB	Decibel	Décibel
DECEA	Departamento de Controle do Espaço Aéreo	Département du Contrôle de l'Espace Aérien
DEP	Distributed Electric Propulsion	Propulsion Electrique Distribuée
DETRAN SP	Departamento de Trânsito de São Paulo	Département de Transit de São Paulo
EASA	European Aviation Safety Agency	Agence Européenne de la Sécurité Aérienne
eCRM	electronic CRM	CRM Électronique
EIA	Energy Information Administration	Administration de l'Information sur l'Énergie
EMBRAER	Empresa Brasileira de Aeronáutica	Société Aéronautique Brésilienne

Emplasa	Empresa Paulista de Planejamento Metropolitano S.A.	Société Paulista de Planification Métropolitaine S.A.
ESA	European Space Agency	Agence Spatiale Européenne
eVTOL	electric VTOL	VTOL Électrique
FAA	Federal Aviation Administration	Administration Fédérale D'Aviation
FAR	Federal Aviation Regulations	Règlements Fédéral d'Aviation
GA	General Aviation	Aviation Générale
GDP	Gross Domestic Product	Produit Intérieur Brut
hab/mi ²	Inhabitants per Square Mile	Habitants par Mile Carré
HSI	High Speed Impulsive	Impulsif Haute Vitesse
IATA	International Air Transport Association	Association du Transport Aérien International
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística	Institut Brésilien de Géographie et de Statistique
ICA	Instrução do Comando da Aeronáutica	Instruction du Commandement Aéronautique
ICAO	International Civil Aviation Organization	Organisation de l'Aviation Civile Internationale
ICE	Internal Combustion Engine	Moteur à Combustion Interne
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia	Institut National de Météorologie
J.F.K.	John Fitzgerald Kennedy	John Fitzgerald Kennedy
kg	kilogram	kilogramme
km/hr	Kilometer per Hour	Kilomètre par Heure
Km ²	Square Kilometer	Kilomètre Carré
L/D	Lift / Drag	Portance / Traînée
Li-Ion	Lithium-Ion	Ion-Lithium
MCP	Maximum Continuous Power	Puissance Maximale Continue
min	minute	minute
MoC	Means of Compliance	Moyens de Conformité
MTA	Metropolitan Transportation Authority	Autorité de Transport Métropolitain
MTOW	Maximum Take-Off Weight	Masse Maximale au Décollage
NASA	National Aeronautics and Space Administration	Administration Nationale de l'Espace et de l'Aéronautique
NM	Nautical mile	Mille Nautique

NO	Nitrogen Monoxide	Monoxyde d'Azote
NO2	Nitrogen Dioxide	Dioxyde d'Azote
nvPM	Non-Volatile Particulate Matter	Particules Non Volatiles
ODM	On Demand Mobility	Mobilité à la Demande
R&D	Research and Development	Recherche et Développement
REH	Rota Especial de Helicóptero	Itinéraire Spécial pour les Hélicoptères
RMSP	Região Metropolitana de São Paulo	Région Métropolitaine de São Paulo
RTCA	Radio Technical Commission for Aeronautics	Commission Technique de Radio pour l'Aéronautique
SIN	Sistema Integrado Nacional	Système National Intégré
SP	São Paulo	São Paulo
STC	Supplementary Type Certificate	Certificat de Type Supplémentaire
TC	Type Certificate	Certificat de Type
TCCA	Transport Canada Civil Aviation	Transports Canada, Aviation Civile
TEL	Tetraethyllead	Plomb Tétraéthyle
TRL	Technology Readiness Level	Niveau de Maturité Technologique
U.K.	United Kingdom	Royaume-Uni
U.S.	United States	États Unis
UAM	Urban Air Mobility	Mobilité Aérienne Urbaine
US\$	United States Dollar	Dollar des Etats-Unis
VSP	Vehicle Sketch Pad	carnet de croquis de véhicule
VTOL	Vertical Take-off and Landing	Décollage et Atterrissage Verticaux
Wh	Watt Hour	Watt Heure
WTC	World Trade Center	Centre de Commerce Mondial

LISTE DES ANNEXES

ANNEXE 1 – Article présenté à l'*International Symposium on Sustainable Aviation 2018* – Université Sapienza di Roma (Juillet/2018).

ANNEXE 2 – Article soumis au *International Journal of Sustainable Aviation (IJSA)*, Septembre/2018.

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier le professeur Darli Rodrigues Vieira, directeur du programme de Maîtrise en Gestion de Projets et professeur au Département de Management, pour l'orientation et le soutien très importants qu'il m'a apporté lors de la rédaction de ce document. Ses connaissances pratiques et théoriques ont grandement contribué à la réalisation de ce travail.

Nous remercions aussi le professeur Christophe Bredillet pour m'avoir donné orientation théorique et de techniques de recherche.

Un merci tout particulier aussi au Chargé de Cours Alencar Bravo pour son orientation et son soutien très importants.

Je voudrais remercier aussi a Paula Lomachinsky et Julia Silva pour le soutien et l'affection de toujours.

1. INTRODUCTION

1.1. Contexte

Peu de temps après l'invention des premières machines volantes plus lourdes que l'air au début du XXe siècle, les pionniers de l'aviation ont commencé à développer des aéronefs capables d'opérations VTOL (à décollage et atterrissage verticaux), évitant ainsi le recours à des pistes. L'invention du premier autogyre, le Cierva C.1, par Juan de La Cierva, en 1920, qui connectait pour la première fois les ailes à un rotor tournant, a donné l'impulsion pratique au développement de l'hélicoptère (premier appareil volant capable de décoller et d'atterrir verticalement). Cependant, le développement initial de l'hélicoptère était relativement lent (Watkinson, 2004) par rapport aux avions, en raison des nombreuses difficultés techniques à surmonter. Le premier hélicoptère pratique, le Focke-Wulf Fw 61 (1938), conçu par Heinrich Focke (Watkinson, 2004), a connu une évolution technique considérable, allant jusqu'à les aéronef VTOL modernes, comme le Bell Boeing V-22 Osprey à rotor basculant ou l'hélicoptère AS350, mais les concepts de base principaux ont été maintenus presque identiques (voir Figure 1).

En ce début de XXIème siècle, une nouvelle révolution technologique est en train de se produire, qui devrait intégrer le transport VTOL dans la vie des gens ordinaires dans les 5 à 10 prochaines années (Uber, 2016). Le principal responsable de cette révolution est la technologie du VTOL électrique (eVTOL),

passée d'un simple rêve de science-fiction à une réalité à concrétiser dans un proche avenir.

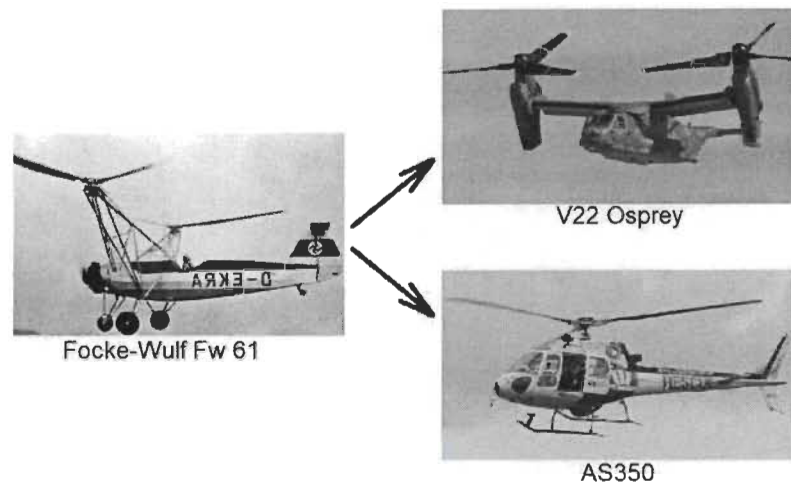


Figure 1. Du FW61 au modernes VTOL

(crédits d'image: FW61 - domaine public / V22 Osprey - Naval Air Systems Command / AS350 - freeimages.com/Candice Courtney)

En octobre 2016, Uber a publié un article intitulé "Avance rapide vers un avenir du transport aérien urbain à la demande (Fast-Forwarding to a Future of On-Demand Urban Air Transportation)" (Uber, 2016), qui a rapidement attiré l'attention de l'ensemble du secteur aéronautique, décrivant sa vision de l'utilisation des aéronefs eVTOL comme plate-forme pour les services aériens de mobilité à la demande (ODM : On Demand Mobility) en milieu urbain. Depuis lors, plusieurs organisations se sont empressées de développer leurs concepts eVTOL afin de faire face à la vision d'Uber pour ce marché. Parmi ceux-ci, les grands acteurs du secteur aérospatial, comme Airbus Group, Embraer, Boeing et Bell Helicopters, des agences gouvernementales comme la NASA et des startups prometteuses

telles que Lillium Aviation, Volocopter, Joby Aviation et Ehang (The Vertical Flight Society, 2018b).

Les concepts proposés varient beaucoup, mais la grande majorité d'entre elles visent à satisfaire le marché des ODM/UAM, qui comprend le transport de passagers ou de petites cargaisons, par voie aérienne, en zone urbaine, ou des trajets courts.

ODM est un nouveau concept de transport urbain. Il comprend l'utilisation d'une plate-forme numérique (architecture logicielle client-serveur) qui permet aux clients de demander des services de transport (mobilité) en fonction de leurs besoins. Ce type de service, qui a été popularisé par la société américaine UBER (mais qui compte maintenant plusieurs concurrents), est basé sur une application installée sur le smartphone du client, qui offre aux clients les fonctionnalités suivantes: entrée des lieux de départ et d'arrivée du voyage, simulation du prix du voyage, demander le transport et payer le service. Ce concept révolutionnaire a permis à UBER de se développer rapidement et d'atteindre plusieurs marchés mondiaux importants, perturbant pratiquement le service de taxi traditionnel.

1.2. Problème général

Le rôle du transport UAM est de nos jours joué par des hélicoptères, régis par les règlements de la partie 135 (navetteurs et taxis à la demande, taxi aérien) ou de la partie 91 (aviation générale) (FAA, 2018a) (FAA, 2018b). Mais, malgré leur souplesse dans la réalisation de nombreux types de missions, les hélicoptères présentent des handicaps largement dépassés par les véhicules eVTOL, lorsqu'ils

envisagent de s'appliquer à des opérations UAM. Nous pouvons citer: coût opérationnel élevé, pollution sonore et atmosphérique.

Le remplacement des hélicoptères par eVTOL dans les transports aériens urbains devrait pousser ce marché à une échelle beaucoup plus grande, tout en le maintenant écologique, avec des niveaux de sécurité plus élevés et des prix au kilomètre inférieurs à ceux des hélicoptères (Uber, 2016). Et la technologie aéronautique eVTOL s'accompagne de la mise en œuvre de solutions telles que la propulsion électrique décentralisée (DEP : Distributed Electric Propulsion), les systèmes de commandes de vol numériques à pilotage augmenté (digital Fly-by-Wire flight control systems) et le vol autonome, ce qui révolutionnera l'UAM (Uber, 2016).

Cependant, la technologie eVTOL doit encore faire face à d'énormes défis avant d'arriver sur le marché (transport de passagers, fret, exploitation commerciale). Il est possible d'énumérer un nombre considérable de ces défis, comme l'absence de réglementation spécifique en matière de certification civile, l'autonomie relativement courte en raison de la faible densité énergétique de la technologie actuelle des batteries et même les doutes quant à l'acceptabilité publique de cette nouvelle technologie (qui peut influencer la demande potentielle).

Parmi les nombreuses difficultés techniques, réglementaires et économiques auxquelles doivent faire face les constructeurs, les investisseurs et les futurs exploitants de ces aéronefs, la question de savoir si une opération initiale serait réalisable reste à déterminer.

Pendant la rédaction de ce "mémoire", UBER exécute actuellement un processus de sélection des villes de lancement pour son service de transport UBER Air (Uber, 2016). UBER Air sera un service ODM / UAM, présentant des caractéristiques similaires à ses services de voiture ODM, mais utilisant un aéronef à propulsion 100% électrique VTOL (eVTOL), portant l'ODM à la troisième dimension (espace aérien). Trois villes doivent être choisies comme cas pilotes pour les premières expérimentations du service. Dallas et Los Angeles ont déjà été choisies et São Paulo et Rio de Janeiro, au Brésil, font partie des candidats retenus dans le processus de sélection (ainsi que des métropoles au Japon, en Inde, en France et en Australie). Nous croyons que le succès du choix des cas pilotes initiaux peut déterminer le destin de la technologie eVTOL pour les applications UAM, et ce succès dépend fortement des caractéristiques des villes choisies.

Ce "mémoire" traitera spécifiquement de la ville de São Paulo (Brésil) et de sa faisabilité en tant que cas pilote possible pour la mise en service initiale d'un service eVTOL ODM / UAM.

1.3. Objet de l'étude et localisation

Cette recherche examinera le chevauchement de l'aviation VTOL, de la propulsion électrique et de la faisabilité des opérations ODM de mobilité aérienne en milieu urbain. La ville de São Paulo (Brésil) sera utilisée comme étude de cas.

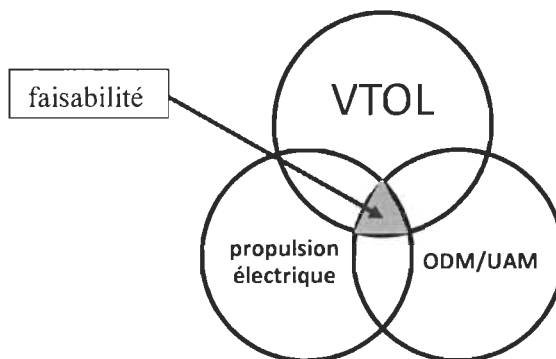


Figure 2. Localisation de l'étude.

1.4. Objectif et questions de recherche

La faisabilité d'eVTOL pour la UAM sera analysée selon trois axes de recherche: technologie, réglementation et marché. Afin de traiter le sujet, deux objectifs principaux et des questions de recherche connexes ont été définis:

- Objectif 1: étudier les solutions techniques actuellement développées par l'industrie eVTOL nouvellement créée, comparer leurs caractéristiques principales et énumérer brièvement les principales difficultés liées à leur mise en service dans l'exploitation UAM;
 - Question de recherche 1.1: Quels sont les principaux concepts en cours de développement pour répondre aux services eVTOL UAM et comment se comparent-ils? (Axe technique);
 - Question de recherche 1.2: Quelles sont les principales difficultés que la technologie eVTOL doit surmonter avant sa mise en service? (y compris l'axe réglementaire);

- Objectif 2: Étudier et analyser les caractéristiques qui font de São Paulo (Brésil) un cas idéal pour l'application d'un service initial eVTOL UAM, en fonction des caractéristiques de faisabilité du marché déjà proposées par UBER;
 - Question de recherche 2.1: Quelles sont les caractéristiques qui font de São Paulo un cas idéal pour le fonctionnement initial d'eVTOL UAM (axe du marché) et comment pourrait-on imaginer un concept d'opération initial (CONOP : Concept of Operation) de ce type de service à São Paulo?

1.5. Périmètre

Les discussions porteront sur la comparaison des principaux modèles en cours de développement, leurs avantages et handicaps, ainsi que sur les principaux défis à relever avant qu'ils soient autorisés à exercer des activités commerciales sur le marché des ODM / UAM.

En outre, la ville de São Paulo sera analysée en fonction des caractéristiques qui en feraient un cas idéal pour une première opération eVTOL UAM.

En l'absence de déploiement commercial de cette technologie (eVTOL) dans ce segment (ODM / UAM), la recherche sera menée sur la base d'une revue de la littérature et d'informations accessibles au public.

2. REVUE DE LITTÉRATURE

Afin de pouvoir indiquer sur la faisabilité technique d'eVTOL de substituer prochainement l'hélicoptère aux applications UAM, une recherche a été effectuée pour comprendre son stade de développement actuel. Une approche des niveaux de maturité technologique (TRL : Technology Readiness Level) (TEC-SHS, 2008) sera attribuée à la technologie eVTOL afin de normaliser l'analyse.

Nous avons également effectué une recherche sur l'histoire de la technique du vol vertical, ce qui nous a permis de mieux comprendre les origines de eVTOL et les concepts de base de cette technologie.

2.1. L'aéronef VTOL convertible (le convertiplane)

Les hélicoptères sont le concept VTOL le plus répandu (Watkinson, 2004). Mais il existe d'autres concepts qui présentent des avantages par rapport à certains types de missions, et c'est le cas lorsqu'on envisage l'application sur le transport UAM.

Le concept d'hélicoptère, qui repose sur ses voilures tournantes pour fournir 100% de sa portance (et de sa poussée), impose de lourdes pénalités pendant la phase de croisière du vol. Les voilures tournantes sont de loin moins efficaces que les voilures fixes dans la génération de portance en vol avant, car elles sont optimisées pour le vol stationnaire (Walsh, Bingham, & Riley, 1987). À la fin des années 1940, de nouvelles conceptions ont commencé à apparaître, visant à combiner les capacités de vol stationnaire, de décollage et d'atterrissage des hélicoptères à la verticale, avec le meilleur rendement de croisière des aéronefs à

voilure fixe. Ce type de conception s'appelait le *convertiplane*. Le *convertiplane* brésilien Heliconair HC-1, conçu par l'ingénieur allemand Heinrich Focke (1952) (Kovacs, 2003), est l'un des premiers exemples de ces tentatives. Le concept du *convertiplane* est un avion capable de décoller et d'atterrir verticalement, en utilisant la portance générée par les rotors, puis en basculant ces rotors pour produire une poussée vers l'avant en vol de croisière, en s'appuyant sur les voilures fixes pour générer 100% de la portance (beaucoup plus efficace que les hélicoptères).

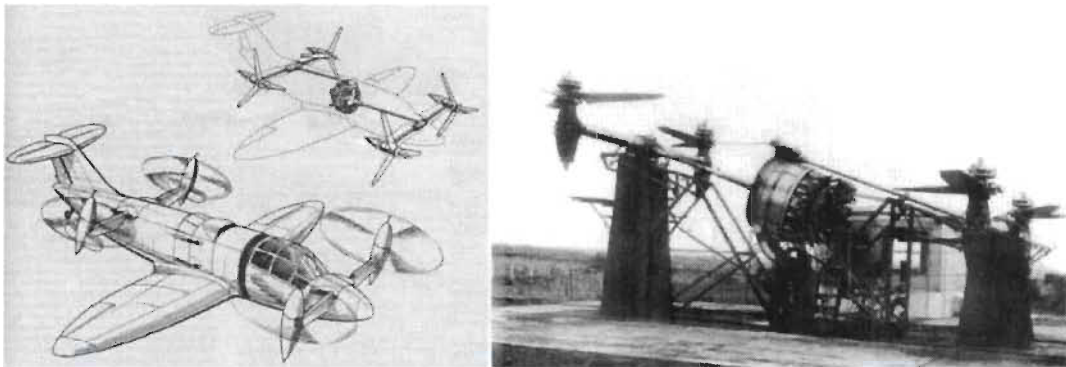


Figure 3. Le Heliconair HC-1 *convertiplane*.

(crédits d'image: domaine public)

Mais ces conceptions de type *convertiplane* étaient mécaniquement beaucoup plus complexes que les hélicoptères classiques. Et c'est la raison pour laquelle, malgré le fait que les programmes de développement d'aéronefs *convertiplanes* existent depuis un certain temps (en particulier pour les applications militaires), la plupart de ces programmes n'ont pas réussi à entrer en production en série. La complexité du contrôle de l'aéronef entre le vol stationnaire et avant, le nombre élevé de pièces mécaniques en rotation (y compris un système de

transmission complexe) et les caractéristiques résultantes en termes de poids élevé et de charge utile faible peut expliquer pourquoi la plupart des conceptions de *convertiplane* ne sont jamais entrées en service (Rothhaar et al., 2014).

Au cours des dernières décennies du XXème siècle, de nouvelles technologies ont fait leur apparition, faisant du *convertiplane* VTOL une solution plus pratique. Ces technologies sont l'utilisation de la commande de vol numérique électronique (fly-by-wire) (pour la stabilisation) et l'utilisation pratique de matériaux composites (allègement de la masse, résultant en une capacité de charge utile plus élevée). L'utilisation de systèmes de transmission mécaniques complexes était toujours inévitable, ces avions étant propulsés par des moteurs à combustion interne (ICE : Internal Combustion Engines), jusqu'aux récents développements en propulsion électrique, donnant naissance au concept de l'eVTOL (Rothhaar et al., 2014).

2.2. Le VTOL électrique

L'eVTOL est une catégorie d'aéronefs VTOL qui utilise des moteurs électriques au lieu des moteurs à combustible fossile (ou à biocarburant) (alternatif ou à turbine). L'utilisation de la propulsion électrique permet aux concepts VTOL d'éliminer le besoin de systèmes de transmission mécaniques complexes. L'utilisation de la propulsion électrique sur le concept VTOL présente plusieurs avantages. Certains des avantages les plus importants sont abordés ci-dessous.

2.2.1. Propulsion électrique et DEP

Les moteurs électriques permettent l'installation de systèmes de propulsion électrique distribuée (DEP: Distributed Electric Propulsion). La DEP consiste à utiliser plusieurs rotors, chacun entraîné directement par un moteur électrique, au lieu d'un seul rotor principal (comme dans la plupart des hélicoptères) (Borer et al., 2016). Les aéronefs équipés du système DEP présenteront des caractéristiques de dégradation progressive, ce qui signifie que les pannes de moteurs ne feront que dégrader la poussée et la contrôlabilité de l'aéronef de manière incrémentielle. Par exemple, si l'un des 10 moteurs électriques du concept NASA GL10 (voir Figure 4) tombe en panne, la capacité de poussée globale de l'appareil sera affectée à environ 10%, ce qui permettra de poursuivre la mission ou d'avorter avec des conséquences mineures. La contrôlabilité de l'aéronef doit rester la même pour le pilote (en raison de la compensation du système numérique de stabilisation) et la capacité de croisière sera affectée de manière minimale. Les conséquences sur la sécurité d'une ou de plusieurs pannes de moteur peuvent être considérées comme mineures jusqu'à un certain niveau de défaillance.



Figure 4. NASA GL10 Greased Lightning (hauts niveaux de DEP).

(crédits d'image: NASA Langley/David C. Bowman)

Le DEP est possible grâce au fait que les moteurs électriques sont très efficaces dans une large gamme de tailles, à la différence des modèles ICE (Brown & Harris, 2018). Il est donc possible d'utiliser plusieurs petits moteurs électriques au lieu d'un seul (ou de quelques) ICE qui repose sur un système de transmission pour distribuer la puissance mécanique aux rotors.

L'utilisation de la propulsion électrique présente également les avantages suivants par rapport à les ICE (Uber, 2016): rapport puissance / poids plus élevé, possibilité d'utiliser une puissance de secours momentanée supérieure à 150% de la puissance maximale continue (MCP : Maximum Continuous Power) en cas de moteur en panne, petit nombre de pièces mobiles (moteur plus simple et pas besoin de transmission), meilleure intégration avec le système de pilote automatique, moins de génération de bruit, coûts de maintenance réduits, zéro émission de gaz en fonctionnement et bien meilleure efficacité énergétique globale environ 10 fois.

2.2.2. Contribution environnementale du eVTOL

L'exploitation des aéronefs VTOL actuels (hélicoptères) dans les zones urbaines entraîne des impacts environnementaux évidents (Amoroso, Castelluccio, & Maritano, 2012). Les plus importants sont le bruit et la pollution atmosphérique. L'impact de la pollution atmosphérique des hélicoptères joue un rôle moins important que celui généré par le bruit, mais il ne peut être totalement négligé, comme on peut le voir au cours de ce chapitre.

2.2.2.1. Pollution sonore

L'augmentation du nombre d'hélicoptères exploités en milieu urbain, en particulier dans les grandes villes, risque de se transformer dans un problème de santé publique lié à la pollution sonore. Les hélicoptères sont perçus par la population en général comme une source de bruit très gênante (Amoroso et al., 2012). Les conceptions actuelles d'hélicoptères présentent trois sources principales de bruit (ICAO, 2015): le rotor principal, le rotor de queue (anti-couple) et le ou les moteurs. Pour chaque type d'hélicoptère et chaque phase de vol, l'une de ces trois composantes joue un rôle majeur dans le bruit global des hélicoptères.

Pour un hélicoptère de conception classique avec rotor de queue libre, certaines règles générales s'appliquent (ICAO, 2015):

- Décollage: c'est la phase de vol lorsque l'hélicoptère utilise plus de puissance et, par conséquent, le rotor anti-couple est plus sollicité. Lors du décollage et de la montée initiale, le moteur et le rotor anti-couple sont les principaux facteurs de bruit des hélicoptères;
- Croisière: en vol de croisière, la puissance et l'anti-couple nécessaires pour maintenir le vol rectiligne et à niveau sont inférieurs à ceux des autres phases de vol. Dans cette phase, la vitesse d'avancement de l'hélicoptère s'ajoute à la vitesse tangentielle de l'extrémité de la pale qui avance (ce qui est important en raison des pales du rotor relativement longues), approche de la région transsonique et génère des ondes de choc. Ce phénomène,

appelé bruit haute vitesse impulsif (HSI: High Speed Impulsive), est le principal facteur de bruit des hélicoptères en croisière;

- Atterrissage: c'est la phase de vol lorsque le bruit de l'hélicoptère est plus fort et dure plus longtemps. Lors de l'approche en vue de l'atterrissage, le phénomène de Interaction Vortex Pale (BVI: Blade Vortex Interaction) crée le bruit caractéristique de pale claquant. BVI se produit lorsque le tourbillon d'extrémité d'aube recircule dans le rotor principal et intercepte les pales suivantes. Le rotor principal est le principal facteur de bruit des hélicoptères lors des phases d'approche et d'atterrissage;



Figure 5. Éléments générateurs de bruit dans les hélicoptères classiques.

(crédits d'image: adapté de L'Armée de l'Air Brésilienne – SD Sérgio)

Les concepts eVTOL en cours de développement éliminent la plupart des caractéristiques de génération de bruit présentes dans les hélicoptères, comme expliqué ci-dessous:

- L'utilisation du DEP, avec plusieurs rotors de petit rayon au lieu d'un (ou de plusieurs) gros rotors, élimine pratiquement le HSI et le BVI;
- Les rotors de queue anti-couple ne sont pas nécessaires (les moments de lacet sont générés par le couple différentiel sur les rotors);
- Pas de moteurs alternatifs ou turbines (utilisation de la propulsion électrique);

Selon (Uber, 2016), le bruit total généré par un taxi aérien eVTOL devrait être aussi bas que celui des véhicules de transport terrestre, comme un camion de taille moyenne. Bien entendu, les caractéristiques de bruit de ces futurs aéronefs eVTOL peuvent varier considérablement en fonction des choix de conception, tels que le chargement des disques de rotor (disc loading: rapport de la masse de l'aéronef sur la surface totale du disque de rotor), propulsion à l'électricité pure ou hybride électrique (batteries + générateurs) et le type de propulsion à adopter (carénée, non- carénée, jet, etc.) (Brown & Harris, 2018).

2.2.2.2. Pollution de l'air

La pollution de l'air générée par les moteurs d'hélicoptères (alternatifs ou à turbines) a généralement une importance moindre dans les discussions sur l'impact environnemental de l'aviation par rapport au bruit des hélicoptères. Mais ces

émissions ne peuvent être négligées, en raison de la proximité des communautés où elles se produisent et des niveaux de toxicité des substances émises.

En raison de l'utilisation de la propulsion électrique, les aéronefs eVTOL présenteront zéro émission opérationnelle de gaz polluants (sauf lorsque des solutions hybrides sont utilisées, mais ces solutions sont hors de propos dans la plupart des concepts eVTOL actuellement en développement, selon nos recherches). En plus de contribuer au fonctionnement globalement durable du service de mobilité aérienne en milieu urbain dans le respect de l'environnement, cet attrait écologique contribuera également de manière décisive à l'acceptation de ces nouveaux types de véhicules par les communautés où ils opéreront.

Par exemple, pour chaque kilo de carburéacteur brûlé (jet A1, utilisé sur des hélicoptères à turbine), environ 3,16 kg de CO₂ sont émis dans l'atmosphère (ICAO, 2016). Ensuite, comparé à une voiture de tourisme classique (par exemple, la Hyundai Elantra), un hélicoptère à turbomoteur AS350B3, fabriqué par Airbus Helicopters, émet environ 11 fois plus de CO₂ par km de vitesse de croisière, pour presque le même nombre d'occupants (6 dans l'AS350B3) et 5 dans l'Elantra) (Eurocopter, 2009) (U.S. Department of Energy, 2018).

En plus d'émettre des gaz à effet de serre (comme le CO₂), les moteurs d'hélicoptère génèrent également une série de composés contaminants, tels que: oxydes d'azote (NO et NO₂), monoxyde de carbone (CO), hydrocarbures non brûlés, oxydes de soufre, particules non volatiles (nvPM), entre autres (ICAO, 2018). Le processus de combustion du carburant Jet A1 utilisé sur des hélicoptères

à turbine (comme le AS350) est un important émetteur de particules fines (moins de 2,5 micromètres), qui présente un risque pour la santé humaine (affectant les poumons, le cœur et même les nerfs) (FAA, 2015).

Les moteurs alternatifs, comme ceux utilisés sur les très populaires hélicoptères Robinson R-44, utilisent de l'essence Avgas (100LL), contenant le plomb tétraéthyle (TEL: tetraethyl lead) comme additif anti-détonant extrêmement toxique pour l'homme (Storino, 2014). Aux États-Unis, l'Avgas est le dernier type de carburant autorisé à utiliser le TEL comme principal anti-détonant. La Administration Fédérale de L'Aviation (FAA : Federal Aviation Administration) déploie des efforts considérables pour introduire des carburants de substitution dans l'aviation générale, qui ne dépendent pas de TEL (FAA, 2015).

La propulsion électrique à utiliser sur eVTOL (qui peut également être appliquée aux aéronefs à voilure fixe de l'aviation générale) est perçue comme une solution très prometteuse par la communauté aéronautique pour réduire la pollution générée par l'aviation.

2.3. Principaux concepts eVTOL en cours de développement

Cette section présente les principaux concepts eVTOL utilisables pour la mission UAM, en cours de développement, et en compare les caractéristiques principales. Les principaux axes de développement de la technologie eVTOL sont illustrés à la Figure 6.

Les différents programmes eVTOL en cours de développement pour faire face aux applications UAM varient beaucoup dans les choix de conception.

Pendant la rédaction de ce "mémoire", ces programmes se déroulent en parallèle et ont pour objectif de fournir un produit pratique pour une mise en service dans un horizon d'environ cinq ans (Uber, 2016).

Il existe des programmes à des stages très avancés, avec des prototypes volants, comme le chinois Ehang 184 et l'Allemand Volocopter VC200, et d'autres programmes en phase initiale mais avec de grandes perspectives, principalement en raison des investissements importants (ingénierie et moyens financiers), comme l'Airbus A3 Vahana et CityAirbus.

2.3.1. Complexité de la conception

La complexité de la conception des aéronefs eVTOL en cours de développement peut varier considérablement en fonction des solutions techniques choisies. Il est naturel de s'attendre à ce que les aéronefs dont la conception est la moins complexe deviennent les premiers à voler des prototypes, car des conceptions plus simples peuvent permettre un développement et des tests beaucoup plus rapides. La même chose peut ne pas être vraie quand on considère le processus de certification, qui analyse plusieurs aspects de la conception liés à la sécurité. La Figure 6 présente une comparaison qualitative des niveaux de complexité des choix de conception eVTOL actuels.

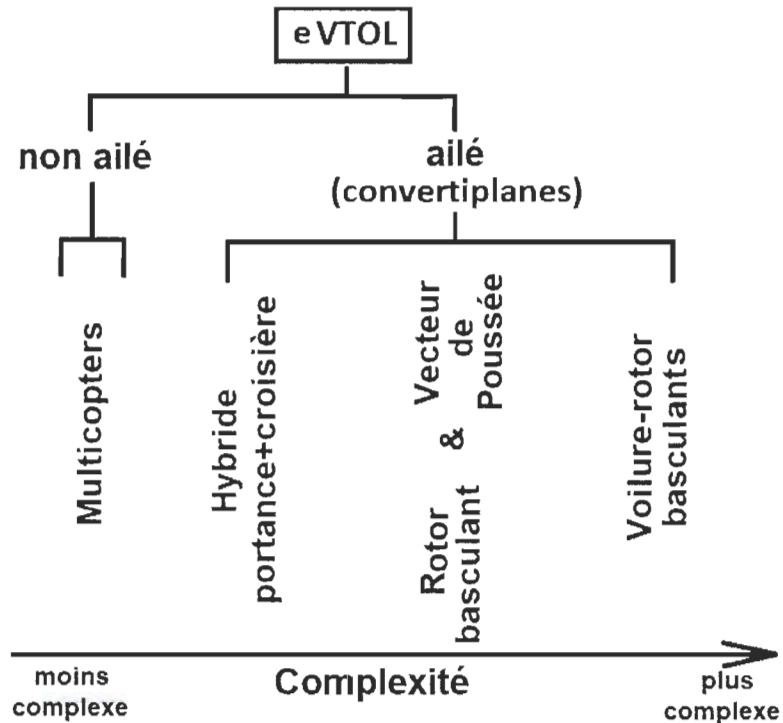


Figure 6. Principaux types de conceptions eVTOL en cours de développement et comparaison qualitative de la complexité.

Parmi les différentes conceptions en cours de développement, les multicopters (non ailé) présentent le plus bas niveau de complexité en raison de l'absence de composants basculants (rotors ou voilures) lors du passage du vol stationnaire à l'avant. Cette caractéristique explique peut-être le fait que certains des premiers aéronefs eVTOL à effectuer des vols habités étaient des multicopters, comme le Ehang 184 (fabriqué par le fabricant de drones chinois Ehang), qui est essentiellement un drone à plus grande échelle, qui a effectué plusieurs vols habités depuis 2015 (The Vertical Flight Society, 2018a). En outre, le Volocopter

VC200 (voir Figure 12) a effectué son premier vol habité en 2016 (The Vertical Flight Society, 2018e).



*Figure 7. Ehang 184 multicopter.
(une conception eVTOL de complexité relativement faible)
(crédits d'image: Ehang)*

Une conception intermédiaire, en termes de complexité, est le Hybride Portance+Croisière. Ces aéronefs présentent un ensemble dédié de rotors utilisés en vol stationnaire, tels que des multicoptères, et un (ou plusieurs) rotor (s) horizontal (s) dédié (s) au vol de croisière. Aucun composant basculante n'est utilisé. Pendant le vol de croisière, les rotors verticaux sont arrêtés et 100% de la portance est obtenue à partir des voilures fixes. Cette conception est en fait un mélange d'un multicopter avec un avion. Le Kitty-Hawk Cora est un exemple de ce type de conception (voir la Figure 8), projet qui est sponsorisé par le cofondateur de Google, Larry Page (Fortune, 2018).

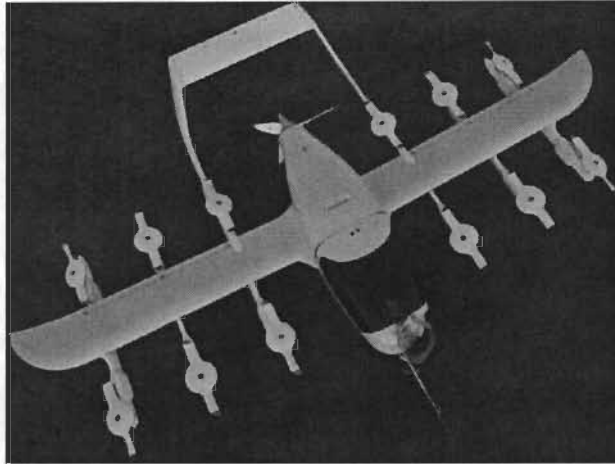


Figure 8. Le Kitty-Hawk Cora Hybride Portance+Croisière.
(crédits d'image: Kitty Hawk Corporation)

La complexité de conception de eVTOL augmente (et par conséquent, l'effort de développement) lorsque des composants basculants sont ajoutés, l'objectif étant d'obtenir de meilleures performances globales, en ajoutant les caractéristiques des voilures.

Les conceptions des Rotors Basculants (exemple de la Figure 9), des Voilure-rotor Basculants (exemple de la Figure 10) et du Vecteur de Poussée (exemple de la Figure 11) sont les plus complexes à développer, en raison de la nécessité de basculer les composants générateurs de portance lors du transfert de portance des rotors vers les voilures, pendant la phase de transition du vol stationnaire au vol en avant. Ces conceptions auront probablement le plus long temps pour développer et voler des prototypes.



Figure 9. Le Joby S4 (rotors basculants).
(crédits d'image: Joby Aviation)

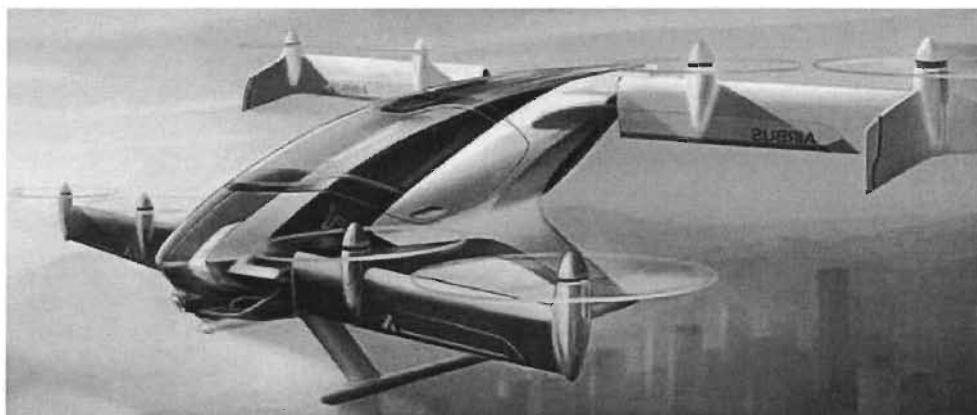


Figure 10. Le Airbus A3 Vahana (voilure-rotor basculants).
(crédits d'image: Airbus A3)

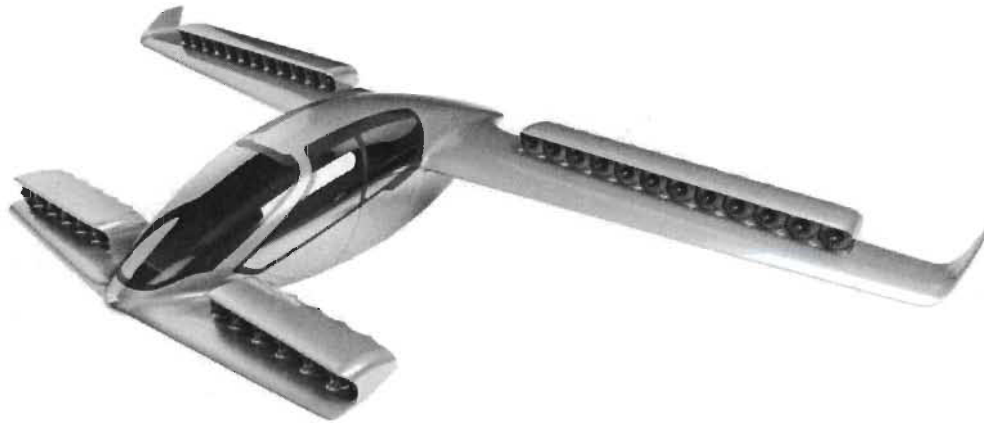


Figure 11. Le Lilium Jet (vecteur de poussée).
(crédits d'image: Lilium Aviation)

2.3.2. Performance et bruit

Le chargement du disque (disc loading) est un paramètre de conception très important pour tout aéronef VTOL, car il affecte la plupart de ses performances et de ses caractéristiques liées au bruit. En règle générale, plus le chargement du disque est faible, meilleures sont les performances de vol stationnaire (moins de puissance est nécessaire pour maintenir le vol stationnaire) (Uber, 2016). Les hélicoptères classiques sont des exemples de VTOL à très faible chargement de disques (en raison de la grande surface du rotor principal). En outre, une charge de disque plus faible entraîne des caractéristiques de vol stationnaire plus silencieuses (Brown & Harris, 2018), ce qui est également un paramètre très important pour l'acceptation de ces véhicules par le grand public / les utilisateurs.

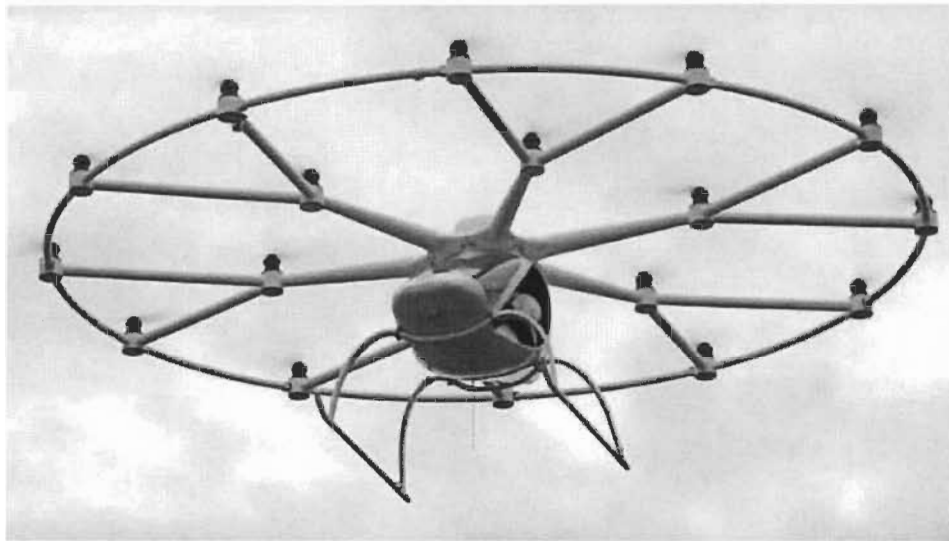
Dans l'univers de choix de conception eVTOL, les multicopters présentent certaines des valeurs de chargement de disque les plus faibles, ce qui permet

d'améliorer les performances de vol stationnaire et de réduire les niveaux de bruit (en vol stationnaire). La faible charge de disque des multicopters est généralement obtenue en utilisant un grand nombre de rotors. Cependant, les multicopters ne sont pas optimisés pour les vols de croisière et présentent des rapports portance / traînée ($L / D : \text{Lift} / \text{Drag}$) très bas, en raison de l'absence des voilures (par conséquent, l'utilisation des rotors pour la portance et la poussée). Par conséquent, les multicopters conviennent mieux aux applications à courte distance / à faible vitesse, telles que les services ODM / UAM, qui fonctionneront dans les limites de la ville.

La présence des voilures (basculantes ou non) dans la conception augmentera considérablement les performances de croisière de l'eVTOL ailés par rapport aux multicopters. Cependant, le choix entre des voilures basculantes ou non peut jouer un rôle important dans les performances de vol stationnaire de ces véhicules. Une aile non basculante est soumise aux flux d'air de rotors et peut réduire la performances du vol stationnaire. C'est la raison pour laquelle, sur la Figure 13, le voile-rotor basculants présente une performance de vol stationnaire relativement meilleure par rapport aux conceptions rotor basculant et hybride portance+croisière.

Les modèles hybride portance+croisière sont également très pénalisants en vol de croisière, car ils transportent le poids des moteurs verticaux inutilisés et la résistance parasite des rotors verticaux arrêtés.

Ces conceptions de *convertiplane* peuvent être utilisées de la même manière dans les services aériens à l'intérieur des limites de la ville ou dans les itinéraires interurbains de milieu de gamme. Cependant, les avantages découlant de l'utilisation des voilures et la possibilité d'atteindre des vitesses plus élevées peuvent ne pas être perçus lors de trajets très courts.



*Figure 12. Volocopter VC200 multicopter.
(le faible charge de disque est similaire a des hélicoptères)
(crédits d'image: Volocopter)*

À l'autre extrême, le vecteur de poussée présente une charge de disque très élevée, associée à l'utilisation de voilures. Le Lilium Jet (voir Figure 11) est un exemple de ce type de conception. Les ventilateurs carénés de petit rayon utilisés sur le Lilium peuvent basculer entre les positions de vol stationnaire (poussée verticale) et de croisière (poussée horizontale). En position de croisière, cette configuration a tendance à présenter des rapports portance / traînée (L / D)

relativement élevés (par rapport aux autres eVTOL), ce qui favorise les applications sur de plus grandes distances / à grande vitesse. Cette conception tend à offrir de meilleurs résultats en termes de portée et de vitesse maximale que les multicopters ou hybride portance+croisière, en raison du L / D plus élevé. Cependant, une charge de disque plus élevée peut entraîner des niveaux sonores plus élevés en vol stationnaire (ce peut ne pas être le cas en vol de croisière), ce qui peut devenir une préoccupation pour ce type de propulsion.

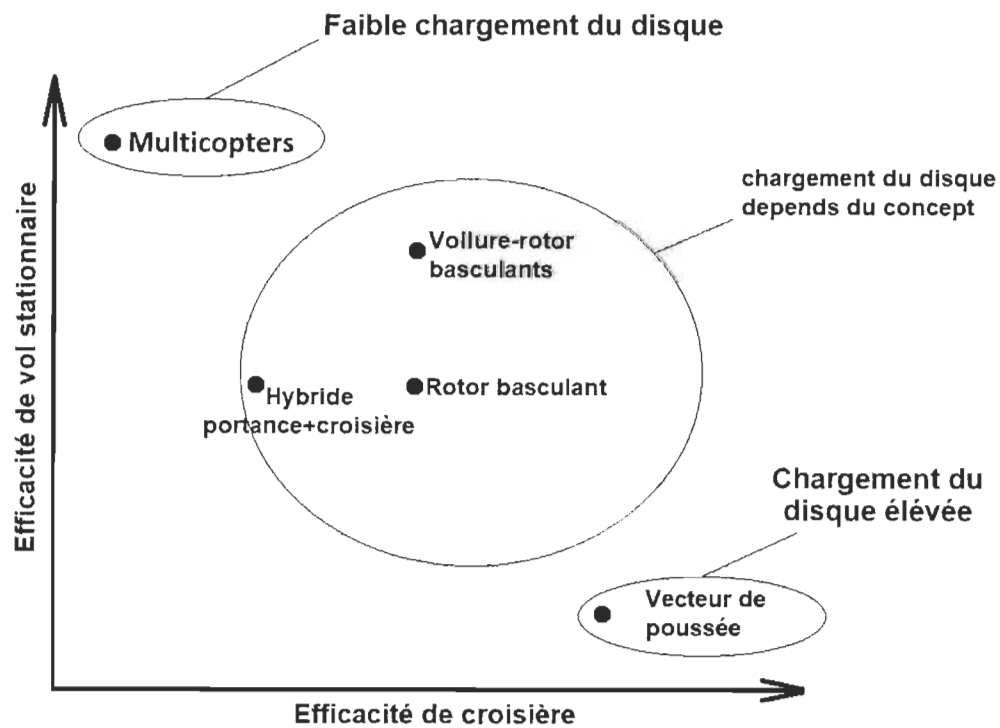


Figure 13. Comparaison qualitative de l'efficacité stationnaire / croisière pour différents types de propulsion eVTOL.

2.4. Principaux défis de la technologie eVTOL

2.4.1. Certification de type

Aucun aéronef ne peut opérer commercialement sans avoir reçu un certificat de type (TC : type certification) d'une autorité de certification reconnue (telle que la FAA, l'EASA, l'ANAC ou la TCCA), ce qui est également le cas pour que l'eVTOL soit utilisé sur les services ODM / UAM. L'Administration Fédérale de l'Aviation (FAA : Federal Aviation Administration) et l'Agence Européenne de la Sécurité Aérienne (EASA : European Aviation Safety Agency) sont les principales autorités au titre desquelles sont délivrés la plupart des TC et certification de type supplémentaire (STC : Supplementary Type Certification) du monde. En outre, les deux entités coopèrent étroitement pour maintenir un niveau d'harmonisation relativement élevé entre leurs réglementations de certification. Les efforts de certification des futurs véhicules eVTOL, souhaitant fonctionner dans la plupart des pays occidentaux (y compris sur les grands marchés de l'aviation tels que les États-Unis et l'Europe), doivent être faits en coopération avec au moins une de ces deux entités.

Au Brésil (où se trouve São Paulo), l'Agence Nationale de l'Aviation Civile (ANAC: Agência Nacional de Aviação Civil) est l'autorité de certification de l'aviation civile à laquelle il faut s'adresser pour obtenir un certificat de type ou valider le certificat de type d'une autre autorité nationale pour opérer au Brésil. Un certificat de type de la FAA ou de l'EASA sera validé par l'ANAC avec des exigences mineures en termes d'essais supplémentaires ou de documentation.

Contrairement à la certification / qualification militaire (axée sur les exigences de la mission), le processus de certification des aéronefs civils (TC ou STC) se concentre sur la démonstration que la conception est conforme aux réglementations visant à garantir le plus haut niveau de sécurité. Gardant à l'esprit ce concept, un nouveau type d'aéronef, comme l'eVTOL, devrait faire l'objet d'un examen approfondi avant de recevoir un TC, ce qui permettra le transport de passagers et, par conséquent, l'exploitation commerciale.

Les discussions sur la base de certification de ces aéronefs ont déjà commencé, mais en raison des multiples types de conceptions (voir 2.3), la définition d'une base de certification unique constitue un défi de taille considérable pour les demandeurs (constructeurs) et les autorités. La base de certification d'un aéronef eVTOL n'est pas encore complètement définie et doit être convenue entre le constructeur et l'autorité, en fonction des spécificités de chaque conception.

Pour illustrer les difficultés rencontrées pour répondre à des exigences de certification spécifiques, choisissons par exemple la condition d'autorotation des hélicoptères. En raison des caractéristiques de rotors de la plupart des multicopters eVTOL (rotors de petit rayon et faible masse), ces véhicules peuvent ne pas être capables d'autorotation (dépend de la conception), condition dans laquelle les hélicoptères doivent pouvoir être contrôlés (FAA / EASA partie 27 ou 29, paragraphe 27.143(a)(2)(v)). Les eVTOLs auront des difficultés à démontrer cette exigence, mais les demandeurs pourront démontrer (par une analyse de conception, des rapports) qu'il est hautement improbable que plusieurs moteurs /

rotors tombent en panne simultanément, si bien qu'une autorotation ne serait pas nécessaire.

En ce qui concerne la certification des aéronefs à voilure fixe, par exemple, la Part 23 originale (petits avions) ne convenait pas à la certification de nombreuses technologies utilisées sur les aéronefs eVTOL ailé, à commencer par les moteurs électriques. La Part 23 traitait des moteurs à piston ou à turbine et les moteurs électriques n'étaient pas certifiables en vertu de cette dernière.

La plupart des conceptions eVTOL en cours de développement, cherchant à être exploitées dans le cadre de la partie 135, présentent la masse maximale au décollage (MTOW : Maximum Take-off Weight) et le nombre de passagers entrant dans les certifications de la Part 23 (petit avion) ou de la partie 27 (giravion de catégorie normale) (FAA ou EASA). Il est donc probable qu'une combinaison des réglementations des parties 23 et 27 sera utilisée pour la certification de ces eVTOL en tant ***que classes spéciales d'aéronefs***.

Le processus de certification d'eVTOL peut être traité dans le document 14 CFR, section 21.17(b) (classes spéciales d'aéronefs), qui définit que pour ces aéronefs "les normes de navigabilité qui n'ont pas été émises..." les exigences applicables seront "... des ***parties*** de ces autres exigences de navigabilité énoncées dans les parties 23, 25, 27, 29, 33 et 35, que la FAA a jugées appropriées pour l'aéronef et applicables à une définition de type particulière, ou les critères de navigabilité que la FAA peut trouver fournissent un ***niveau équivalent de sécurité*** à ces parties".

En règle générale, les constructeurs d'eVTOL doivent avoir pour objectif de démontrer un niveau de sécurité équivalent ou supérieur aux conceptions actuelles d'avions et d'hélicoptères, afin d'obtenir la certification de type.

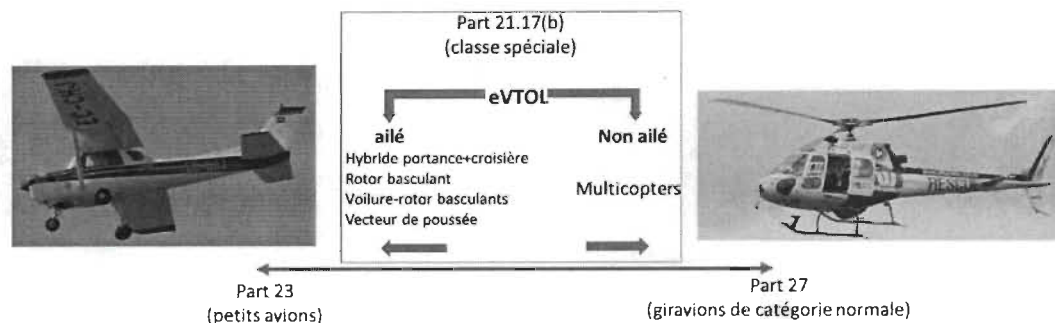


Figure 14. Certification d'eVTOL comme aéronef de classe spéciale.

(crédits d'image: avion - freemages.com/rubenshito / hélicoptère - freemages.com/Candice Courtney)

Le règlement 14 CFR Part 23 de la FAA adopté récemment (en vigueur à compter du 30 août 2017) a été reformulé (amendement 64), ce qui a introduit le concept de normes consensuelles pour la démonstration de la conformité aux normes de certification (FAA, 2017). Selon la AC 23.2010-1 (FAA, 2017), les normes consensuelles sont "des normes développées par l'industrie et que l'Administrateur a accepté d'utiliser comme moyen de conformité aux règlements de la Partie 23...". Cela signifie que des institutions non gouvernementales reconnues de l'industrie aéronautique, telles que la Société Américaine des Tests et des Matériaux (ASTM : American Society for Testing and Materials) et la Commission Technique de Radio de l'Aéronautique (RTCA : Radio Technical Commission for Aeronautics), par exemple, peuvent collaborer avec les fabricants

pour proposer à l'administrateur (autorité de certification) un autre moyen de démontrer la conformité aux exigences de la Partie 23.

L'EASA s'est harmonisée avec l'amendement 64 de la Partie 23 et a publié une révision du CS-23 (amendement 5), en vigueur depuis le 1er avril 2017 (EASA, 2017).

Par conséquent, les conceptions eVTOL qui demandent la certification avec une approche de la Partie 23 / amendement 64 (possible pour les conceptions ailés), demandant une classification dans la classe spéciale (21.17 (b)), sont plus susceptibles d'obtenir la certification plus rapidement que l'approche de la partie 27 (comme le cas pour les multicopters).

Comme le montre ce qui a été exposé ci-dessus, le principal défi réglementaire pour la mise en service d'eVTOL est la certification civile. Bien entendu, cette certification n'exclut pas la nécessité de se conformer à d'autres réglementations locales pour l'utilisation de ces véhicules dans des environnements urbains spécifiques, telles que les réglementations municipales (voir 2.10). On s'attend à ce que les conceptions d'eVTOL qui obtiennent une certification de type soient mieux acceptées pour effectuer la mission UAM que les hélicoptères, en raison des nombreux avantages qu'elle présente en termes d'exploitation durable (pollution, bruit, sécurité).

Par conséquent, on peut dire qu'une base réglementaire est en train d'être établie pour la technologie eVTOL et, bien que cette base soit encore embryonnaire, de gros efforts (de la part des autorités et de l'industrie) sont en

cours pour la définir comme un consensus entre les autorités de l'aviation et le l'industrie, et le point de départ pour cela existe déjà.

2.4.2. Autres défis de la technologie eVTOL

L'obtention d'une certification de type n'est pas le seul défi que pose la mise en service de véhicules eVTOL.

Cette session se contentera d'énumérer et de présenter brièvement quelques-uns des principaux défis supplémentaires. L'impact de ceux qui utilisent concrètement eVTOL dans la mobilité aérienne urbaine doit faire l'objet de recherches et d'analyses approfondies.

- Endurance: la densité énergétique (quantité d'énergie disponible par kilogramme de batterie) des batteries chimiques est encore très faible par rapport au carburant fossile, se situant autour de 100-200 Wh / kg pour une batterie Li-Ion typique, contre environ 1600 Wh / kg pour le kérosène, par exemple (Tyan, Van Nguyen, Kim, & Lee, 2017). Ainsi, afin d'avoir une endurance pratique minimale, les batteries représenteront un pourcentage considérable (jusqu'à 30%) du poids brut de l'aéronef (Ullman, Homer, & Horgan, 2017). Les systèmes hybrides (batteries + générateur auxiliaire) peuvent être utilisés pour augmenter l'endurance, mais apportent le handicap de produire des émissions polluantes au cours de certaines phases du vol.

- Gestion de l'autonomie et de l'espace aérien: la plupart des solutions proposées sur le marché des UAM sont censées avoir des capacités de vol autonomes (Uber, 2016), bien que le vol autonome vienne dans une seconde phase, avec une opération initiale pilotée par un pilote humain. La capacité de vol autonome vise principalement à: réduire le coût de l'opération (pas de pilote à bord) et améliorer les niveaux de sécurité généraux (grâce à une procédure de vol entièrement automatisée). En outre, lorsqu'un grand nombre de ces aéronefs utiliseront l'espace aérien urbain restreint, des modifications considérables devront être apportées aux systèmes de gestion de l'espace aérien et aux règles permettant de faire face au nouveau trafic, tout en maintenant des niveaux de sécurité élevés.
- Licences de pilote: les pilotes seront embarqués au moins pendant les premières années d'exploitation des aéronefs eVTOL. Aucune réglementation spécifique n'indique quel type de licence sera nécessaire (et comment l'obtenir) pour piloter ces aéronefs. En outre, lors de la délivrance de ces licences, il faudra probablement des pilotes possédant une expérience préalable dans les hélicoptères et les avions (ce qui peut entraîner des coûts supplémentaires pour le processus);

2.5. Le concept ODM/UAM, et comment il peut contribuer à atténuer les problèmes de circulation dans les grandes métropoles

Le services aériens de mobilité à la demande (ODM : On Demand Mobility) est un concept créé par la NASA (Holmes et al., 2017) dans lequel des véhicules aériens entièrement électriques seraient utilisés pour le transport de personnes et de marchandises, dans les zones urbaines ou les trajets inter-urbains. Ces véhicules utiliseraient la troisième dimension (espace aérien) pour résoudre les problèmes créés par l'excès de véhicules dans les rues (espace à deux dimensions) des grands centres urbains. Ce type de service viendrait s'ajouter aux services UAM existants, déjà fournis par des hélicoptères (ambulance aérienne, maintien de l'ordre, surveillance aérienne, taxi aérien, entre autres) ou même le remplacer (et très probablement) à l'avenir.

Les problèmes de congestion du trafic dans les grandes villes comme Los Angeles (États-Unis), São Paulo (Brésil) et Bangalore (Inde) ont atteint des niveaux qui ne peuvent pas être facilement résolus par de simples mesures (telles que la limitation du trafic aux heures de pointe, comme à São Paulo). Des solutions plus coûteuses, telles que l'amélioration de l'infrastructure urbaine pour les voitures et les bus (élargissement des rues, construction de corridors à grande vitesse et de tunnels), sont longues à mettre en œuvre, ce qui est généralement en retard sur le taux de croissance du trafic dans ces villes.

À São Paulo, par exemple, l'immatriculation de voitures neuves augmente en moyenne de 4% par an (Assunção, 2005), bien plus que les investissements dans

les infrastructures routières. Les investissements dans les véhicules de transport en commun terrestres, tels que le métro, ont également des coûts élevés et sont longs à réaliser. Et, dans le cas des bus, ils peuvent également contribuer négativement au trafic et à la pollution de l'air (car la plupart d'entre eux sont alimentés par des moteurs diesel).

Ce scénario de crise sur les transports au sol (avec les plus gros contributeurs étant les voitures et véhicules lourds) ne se limite pas aux pays en développement, bien que ses caractéristiques y soient plus marquées (en raison du manque criant d'investissements dans les infrastructures de transport). Los Angeles, New York, San Francisco, Londres, Atlanta et Miami font également partie des 10 métropoles les plus congestionnées au monde (INRIX, 2018). La population des 10 villes les plus congestionnées du monde passe en moyenne 2,7 heures par jour dans les embouteillages (voir Tableau 1).

Tableau 1. Nombre moyen d'heures de trafic dans les 10 villes les plus congestionnées au monde. (source: INRIX Global Traffic Scorecard, 2018)

Ville	Classement	Temps moyen passé dans la congestion par jour (heures)
Los Angeles (États Unis)	1	3.40
Moscow (Russia)	2	3.03
New York (États Unis)	3	3.03
Sao Paulo (Brazil)	4	2.86
San Francisco (États Unis)	5	2.63
Bogota (Colombia)	6	2.50
London (Royaume-Uni)	7	2.46
Magnitogorsk (Russia)	8	2.43
Yurga (Russia)	9	2.36
Atlanta (États Unis)	10	2.33
Moyenne→		2.70

La technologie eVTOL peut être utilisée (avec plusieurs autres, comme le covoiturage, par exemple) pour atténuer ce scénario de crise, en prenant une partie du trafic terrestre dans les airs, en utilisant des véhicules à zéro émission pour cette tâche (en conséquence, en évitant la pollution de l'air, bien que la pollution sonore doive être étudiée). La possibilité d'empiler ces véhicules aériens sur plusieurs niveaux, avec une séparation contrôlée verticale et horizontale entre eux, augmentera considérablement la capacité de transport de personnes / de biens dans l'environnement urbain (voir la Figure 15), ainsi que de courtes routes interurbaines.

Bien sûr, un service aérien de porte à porte (comme un taxi automobile ou un service Uber) ne sera probablement pas pratique dans un premier temps, en raison des aspects opérationnels d'un véhicule volant, comme par exemple: la nécessité de disposer d'une aire d'atterrissage préparée, ou similaire, les profils de décollage et d'approche doivent être dégagés de tout obstacle (tels que bâtiments, lignes électriques, etc.). En outre, l'utilisation privée de ces véhicules par l'utilisateur final, à l'instar des voitures privées, n'est pas envisagée dans un avenir proche, car une licence de pilote devrait pouvoir être utilisée.

Le CONOPS (Concept of Operations) d'UAM eVTOL considérera probablement que ces services de transport fonctionneront à partir de plateformes d'atterrissage dédiées (ou vertiports, appelées par UBER) distribuées dans toute la ville et exploitées par des sociétés ODM / UAM. Si nous considérons ce scénario

(qui est le plus probable pour le fonctionnement initial de ces services), un exemple de CONOPS pour un service ODM eVTOL pourrait être représenté à la Figure 17.

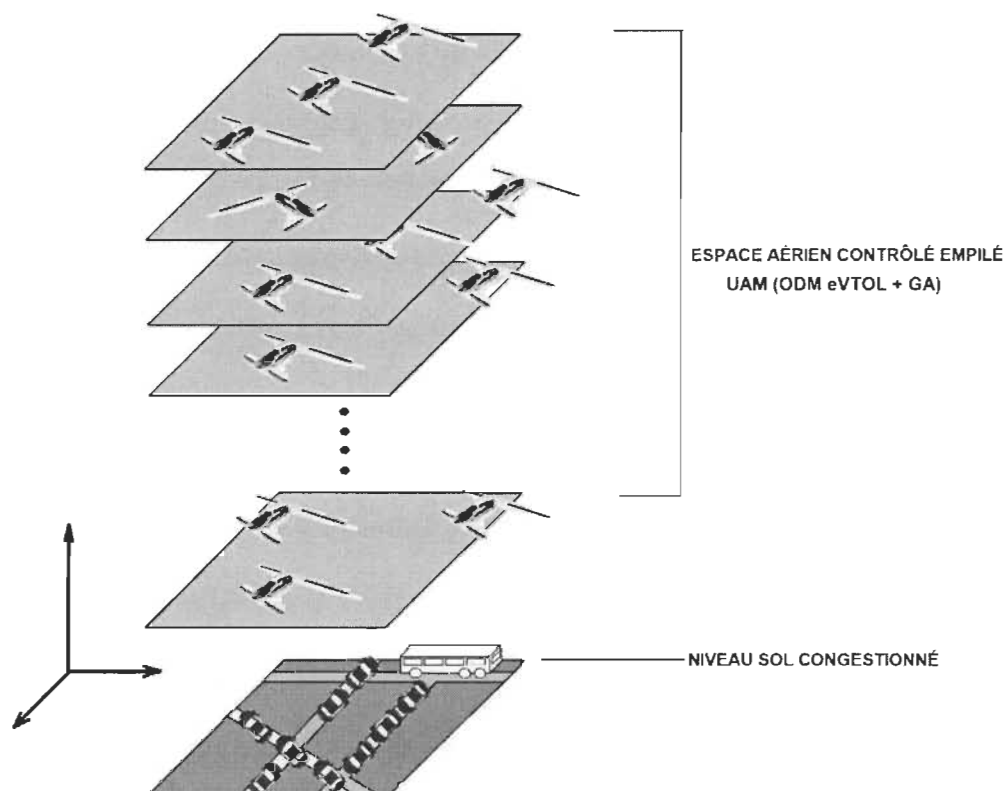


Figure 15. ODM/UAM occupe la troisième dimension de l'espace urbain, en allégeant le trafic au sol.

Le client demandera le service via une application installée sur son smartphone (voir Figure 16). Il sera nécessaire de saisir dans l'application les informations concernant les adresses de départ et d'arrivée prévues. L'application communiquera avec la plate-forme logicielle et informera la plus proche plate-forme d'atterrissage. Il y aura trois options différentes pour le client: un service de

covoiturage programmé (dans lequel le client partagera le voyage et son coût avec d'autres clients), un service de covoiturage non programmé (sur demande) et le trajet individuel (voyage) payé par un seul client, bien que plusieurs passagers puissent monter à bord, comme dans un taxi ordinaire). Le modèle de covoiturage aura très probablement des départs réguliers et des itinéraires fixes, comme un système de bus de rue. Le trajet individuel permettra au client de choisir une heure de départ spécifique.

Le service permettra au client d'inclure dans le tarif un service de taxi terrestre (comme Uber ou Cabify) qui le conduira de sa position actuelle à la plate-forme d'atterrissage la plus proche, après quoi le voyage suivra dans les airs avec l'eVTOL. De plus, un taxi terrestre peut être mis à disposition à la plate-forme d'atterrissage pour arriver à destination afin de compléter le voyage.



Figure 16. Concept d'application client ODM, fonctionnant sur un smartphone, montrant les phases sol et vol du voyage ODM (de A à B).

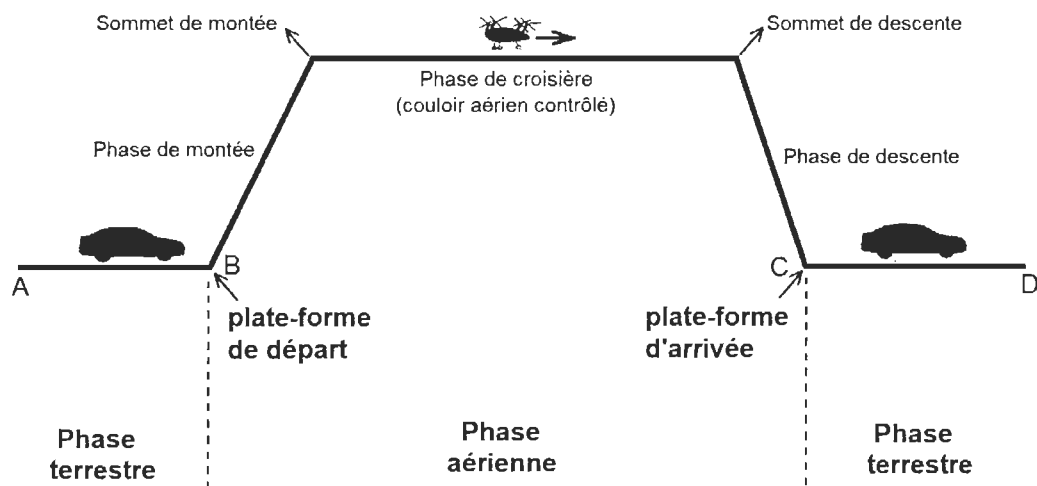


Figure 17. Concept d'opérations (CONOPS) pour un service ODM/UAM générique. Vue de profil, avec départ en A et arrivée en D.

2.6. São Paulo et ses grands problèmes de trafic

São Paulo, la mégapole Brésilienne, est la ville la plus grande et la plus peuplée du pays, avec environ 12 millions d'habitants en 2017 (IBGE, 2017). São Paulo forme, avec 39 autres municipalités, une agglomération continue appelée "Région métropolitaine de São Paulo" (RMSP), avec environ 21,4 millions d'habitants, qui représente environ 17,63% (256 milliards de dollars américains) du PIB total du Brésil. (EMPLASA, 2018). À titre de comparaison seulement, le PIB de la RMSP équivaut à près de 46% du PIB de l'Argentine (environ 554 milliards de dollars américains (World Bank, 2017)).

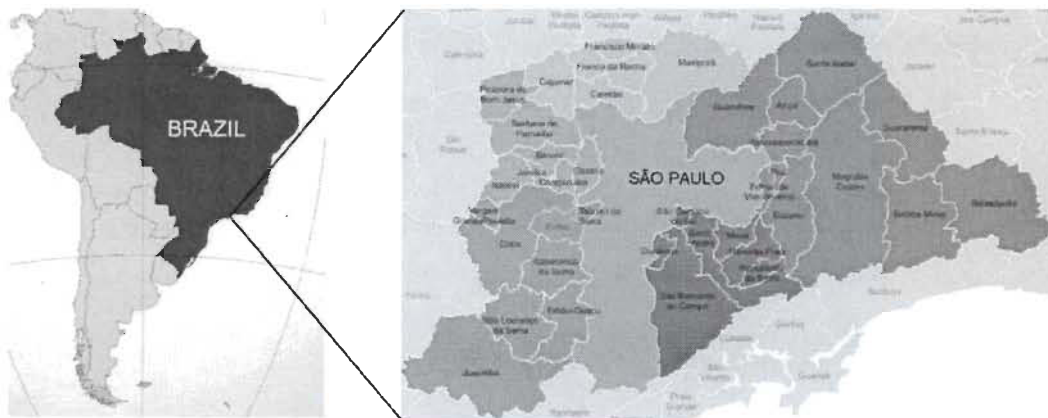


Figure 18. La RMSP, Mégapole du Brésil.

(crédits d'image: adapté de Emplasa)



Figure 19. Centre-ville de São Paulo.

(crédits d'image: freeimages.com/photographer/carloshf-42809)

São Paulo souffre d'un trafic saturé, ses citoyens passant en moyenne 2 heures et 51 minutes par jour au quotidien dans des conditions de circulation saturées (INRIX, 2018). La flotte totale de São Paulo compte environ 8,7 millions de véhicules automobiles (DETRAN SP, 2018), avec une moyenne de 22 300 véhicules neufs immatriculés par mois (DETRAN SP, 2018).

Le trafic intense ne consomme pas que le temps des habitants de São Paulo, il pose également des risques graves pour sa santé, car la pollution générée par l'immense flotte cause plusieurs maladies cardiorespiratoires (de Paula Santos et al., 2005) en raison des particules lourdes émises par les moteurs à combustion interne. Une étude récente a révélé qu'à São Paulo, bien que le parc d'autobus ne représente qu'environ 5% du parc total, il contribue pour près de 50% à la pollution totale de l'air générée par les véhicules automobiles (Brito et al., 2018).

Les problèmes de circulation à São Paulo ne semblent pas trouver de solution à court terme, car les investissements dans les transports en commun et les infrastructures sont loin d'être nécessaires. À titre d'exemple, le transport en métro est relativement restreint (pour la taille de la demande de la ville), avec environ 100 km (Metrô CPTM, 2016) de lignes (relativement petites comparées à celles de New York, par exemple, avec environ 394 km de lignes (MTA, 2016)).

Le centre financier de São Paulo a migré au cours des 20 dernières années de la région de «l'Avenida Paulista» vers la région de «Brooklin Paulista». Plusieurs conglomérats multinationaux et brésiliens se sont installés dans la région située autour de l'avenue Eng. Luis Carlos Berrini. Ce mouvement s'est accompagné de la construction de plusieurs nouveaux immeubles de bureaux dans cette région, déjà équipés d'hélicoptères (une plate-forme pour les opérations de décollage et d'atterrissage d'hélicoptères). Comme on peut le voir sur la Figure 20, la concentration de ces hélicoptères est considérable. La figure montre une petite zone d'environ 0,2 km², qui contient 9 hélicoptères au-dessus d'immeubles de bureaux.



Figure 20. Héliports dans la région de Brooklin Paulista (9 héliports sont visibles dans la photo).

(crédits d'image: adapté de google maps)

Le principal aéroport international desservant RMSP, l'aéroport international de São Paulo / Guarulhos (code IATA GRU, code OACI SBGR), est situé dans la municipalité voisine de Guarulhos, qui fait partie du RMSP. Cet aéroport reçoit environ 37 millions de passagers par an (GRU Airport, 2018), ce qui en fait le plus important aéroport du Brésil. L'aéroport de GRU est situé à environ 20 km du centre-ville de São Paulo et à 30 km de son centre financier (Brooklin Paulista), mesuré en ligne droite (navigation par grand cercle).

Cependant, pour arriver à GRU depuis Brooklin Paulista ou ses environs, il est très courant de passer entre une heure et demie et deux heures en transit pendant les heures de pointe à parcourir les 50 km (itinéraire le plus rapide) dans le trafic encombré de São Paulo, voir la Figure 21.

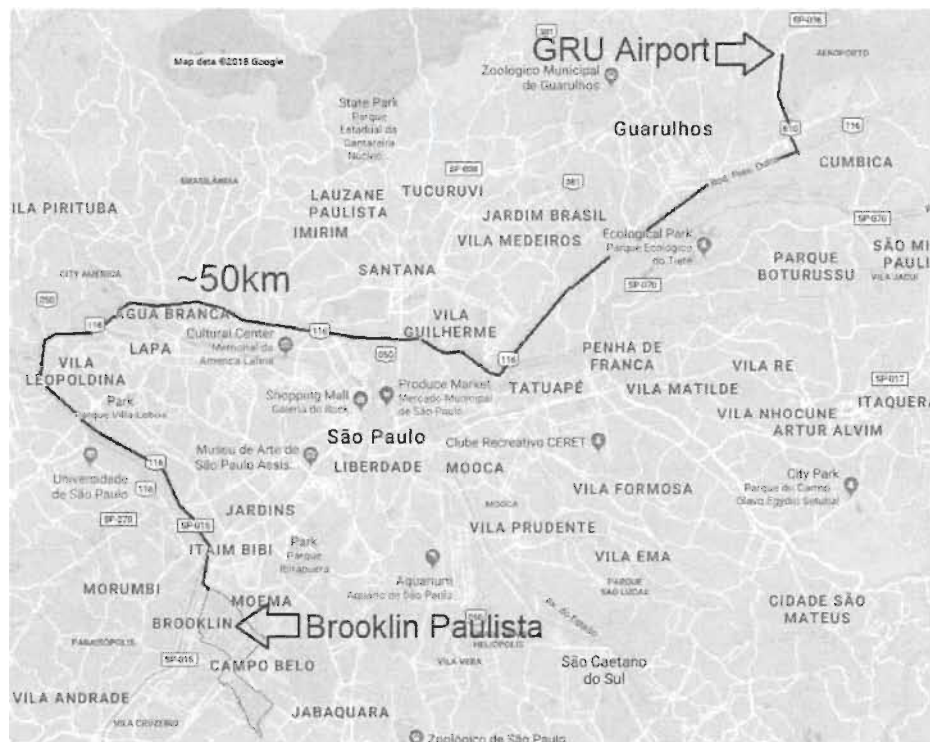


Figure 21. Route le plus rapide à l'heure de pointe de Brooklin Paulista à l'aéroport GRU. (google maps)

Des solutions pouvant contribuer à réduire le trafic au sol, ainsi que des réductions d'émissions polluantes, sont les bienvenues à être mises en œuvre à São Paulo. Et le vol vertical (avec une propulsion électrique, comme eVTOL) correspond parfaitement à ce besoin.

2.7. Les hélicoptères à São Paulo

La ville de São Paulo est considérée comme la capitale mondiale de l'hélicoptère, en nombre d'hélicoptères en opération (ABRAPHE, 2013), suivie de New York et de Tokyo. En 2013, avec environ 400 hélicoptères en fonctionnement et environ 2 000 opérations de décollage / atterrissage par jour, São Paulo a été isolé en première position de ce classement (ABRAPHE, 2013). Cependant, en raison de la forte récession, la baisse de l'économie brésilienne de 2014 à 2016 a touché tous les secteurs de l'économie du pays. São Paulo oscille désormais chaque année entre la première et la deuxième position de ce classement. Avec la reprise du pouvoir par l'économie brésilienne (ce qui se passe depuis 2017) (World Bank, 2018), ce leadership tend à se consolider.

Le succès du vol vertical (en ce moment, fourni par des hélicoptères, avec tous leurs inconvénients inhérents) à São Paulo peut être attribué à un croisement de deux conditions: le trafic intense déjà mentionné dans ce texte, ainsi que le riche état de l'économie de la ville (voir 2.6). Les énormes embouteillages aux heures de pointe, dans cette ville qui héberge plusieurs grands conglomérats économiques brésiliens et multinationaux, posent des difficultés lors du déplacement au sol de cadres, de professionnels de taille moyenne ou tout simplement de visiteurs de la ville qui ne veulent pas dépenser presque 2 heures de trafic pour se rendre du centre financier à l'aéroport international de Guarulhos.

En raison de la grande quantité d'hélicoptères exploités à São Paulo, un système dédié de contrôle du trafic aérien (ATC: Air Traffic Control), situé dans l'aéroport de Congonhas (centre-ville de São Paulo), a été créé en 2004. Ce système de contrôle de la circulation par hélicoptère est unique au monde, et s'appelle Helicontrol (RottaAtiva, 2014) (DECEA, 2018) (Silva Castilho & Andrade, 2012) (Lencioni, 2014). Sous la responsabilité de l'armée de l'air brésilienne, Helicontrol assure la gestion de la circulation des hélicoptères à l'intérieur des routes spéciales pour hélicoptères (REH: Rotas Especiais de Helicópteros) situées dans un polygone comprenant le centre-ville de São Paulo, ainsi que des couloirs d'hélicoptères entrants / sortants. Les REH sont des couloirs aériens, des rues spéciales dans le ciel, consacrés à la circulation des hélicoptères au-dessus de São Paulo (voir la Figure 22). Comme cette zone est un espace aérien de classe C, toute opération d'hélicoptère à l'intérieur de celle-ci doit être autorisée (DECEA, 2018) par Helicontrol.

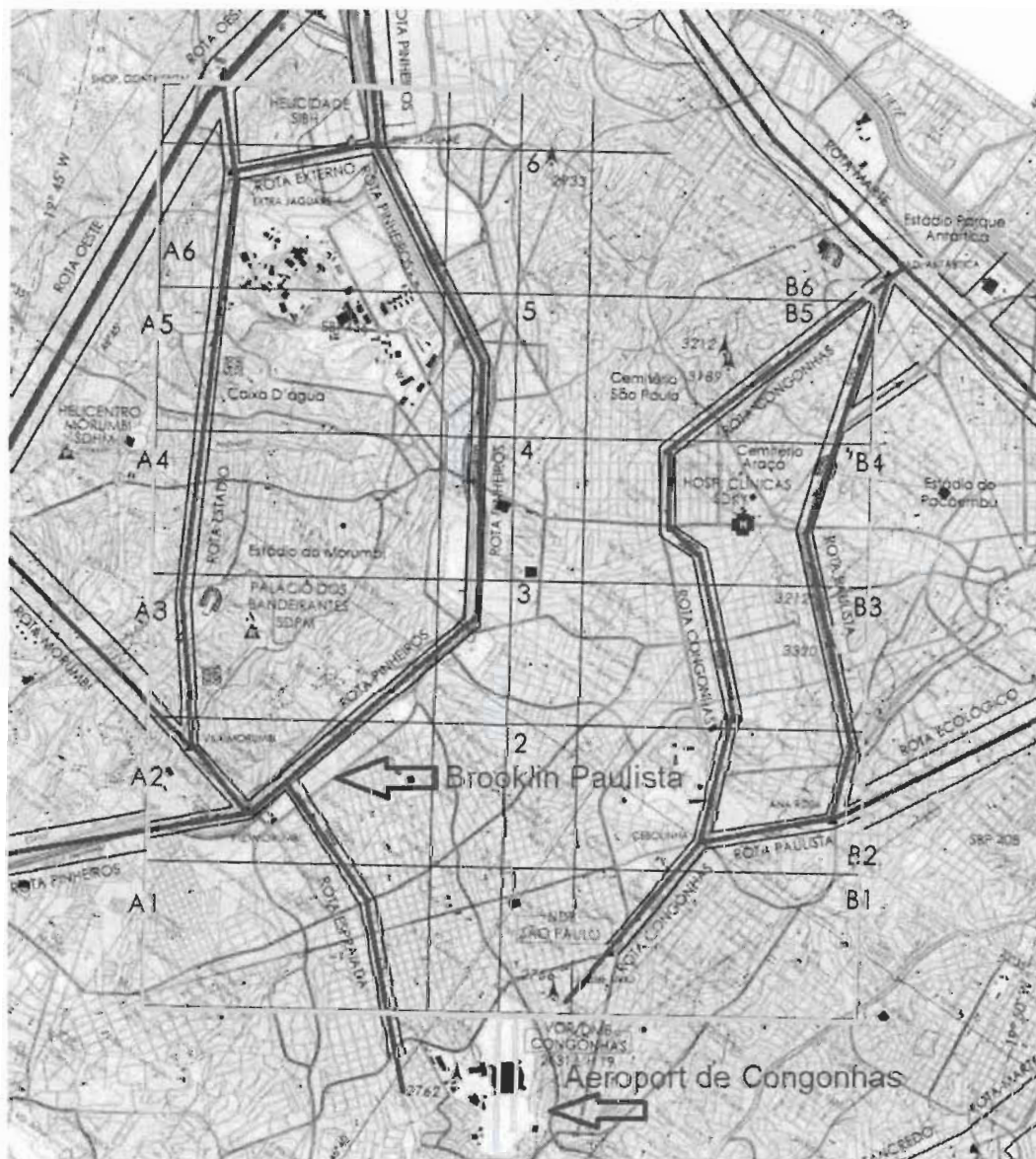


Figure 22. En jaune, l'espace aérien sous vigilance d'Helicontrol. En rouge, les routes spéciales pour hélicoptères (REH) au-dessus de la région de Brooklin Paulista.

(adapté de Annexe 4 de AIC N23/13 (DECEA, 2013))

2.8. Expériences ODM/UAM actuels à São Paulo

Afin d'explorer la demande de transport vertical à São Paulo, certaines entreprises offrent déjà des services d'hélicoptère à la demande (ODM), avec des résultats prometteurs. Le modèle commercial de ces sociétés repose sur la location de temps libre (temps non utilisé par l'opération principale de l'hélicoptère, comme le taxi aérien exécutif, par exemple) des hélicoptères d'opérateurs de taxi aérien (partie 135) et sa revente aux clients finaux via une plate-forme logicielle (site Web ou application pour smartphone) offrant des fonctionnalités similaires à celles décrites à la section 2.5. Les hélicoptères n'appartiennent pas à l'explorateur du service (entreprise ODM), ce qui contribue à faire baisser le coût global du billet puisque tous les coûts opérationnels de l'hélicoptère sont à la charge de l'exploitant de taxi aérien. Il s'agit là d'une activité intéressante pour les propriétaires (ou les explorateurs) d'hélicoptères, puisque maximiser le temps de vol des hélicoptères minimise le coût horaire annuel de son exploitation.

À l'heure actuelle, l'expérience la plus marquante en matière d'ODM / UAM à São Paulo est VOOM, une filiale d'Airbus spécialement créée pour explorer ce type de service, utilisant des hélicoptères. VOOM est présent à São Paulo et à Mexico (une autre mégapole avec un trafic très encombré) (Voom, 2018).

Pour réserver un vol en hélicoptère On Demand à São Paulo, vous pouvez vous rendre sur le site Web de VOOM (<https://www.voom.flights/pt>) ou par l'intermédiaire de son partenaire Cabify (<https://cabify.com/en/brazil/sao-paulo>)

application smartphone ou site web. Le modèle de voyage est très simple et intègre le transport terrestre avec le transport aérien lui-même. En utilisant l'application Cabify, l'utilisateur réservera l'intégralité de son voyage, de la position actuelle à la destination finale. La partie terrestre sera réalisée par les voitures Cabify qui conduiront le passager aux héliports VOOM les plus proches. Pour effectuer le paiement, les contrôles de sécurité et les procédures d'embarquement final, il est nécessaire d'arriver à l'héliport / héliport au moins 15 minutes avant l'heure réservée. Les Figure 24 et Figure 25 montrent les étapes à suivre pour réserver un vol via le site Web de VOOM.

Actuellement, VOOM opère à partir de 8 héliports à São Paulo (voir la Figure 23) et 1 à Campinas / SP (~ 90 km) et, à partir des données fournies par VOOM, il a été possible de construire le Tableau 2, qui fournit des comparaisons des voyages aériens et la durée des voyages au sol, et répertorie les prix publiés pour les billets (Voom, 2018). On peut constater qu'il est possible de réserver un vol en hélicoptère ODM entre le centre financier de São Paulo et l'aéroport GRU pour 100,00 USD (en considérant 1 USD pour 4 Real brésilien, taux de conversion du 1er octobre 2018). Ce trajet, qui prendrait entre une heure et une heure et demie en voiture, pourrait être effectué en moins de 20 minutes par hélicoptère.

Bien que beaucoup de choses aient été dites à propos de VOOM dans les médias, aucune information sur la rentabilité ni aucune donnée sur l'occupation et le nombre de vols n'a été rendue publique pour le moment.

Tableau 2. Prix des ODM en hélicoptères et durées de voyages entre certains hélipads/hélidecks de VOOM à São Paulo (source VOOM).

Route	Origine	Destination	Distance au sol en voiture (km)	Vitesse moyenne en heure de pointe, en voiture (km / h)*	Temps de conduite, en voiture (min)	Durée du vol en hélicoptère (min)**	Coût (US\$)
A - F	A - Itaim Bibi	F - GRU airport	47.7	25	114	15	95
B - F	B - Berrini	F - GRU airport	48.6	25	117	17	100
C - F	C - Paulista	F - GRU airport	28.2	25	68	11	100
D - F	D - Alphaville	F - GRU airport	51.8	50	62	17	97.5
B - E	B - Berrini	E - Campinas	96.3	100	58	27	150
D - A	D - Alphaville	A - Itaim Bibi	27.5	50	33	9	57.5

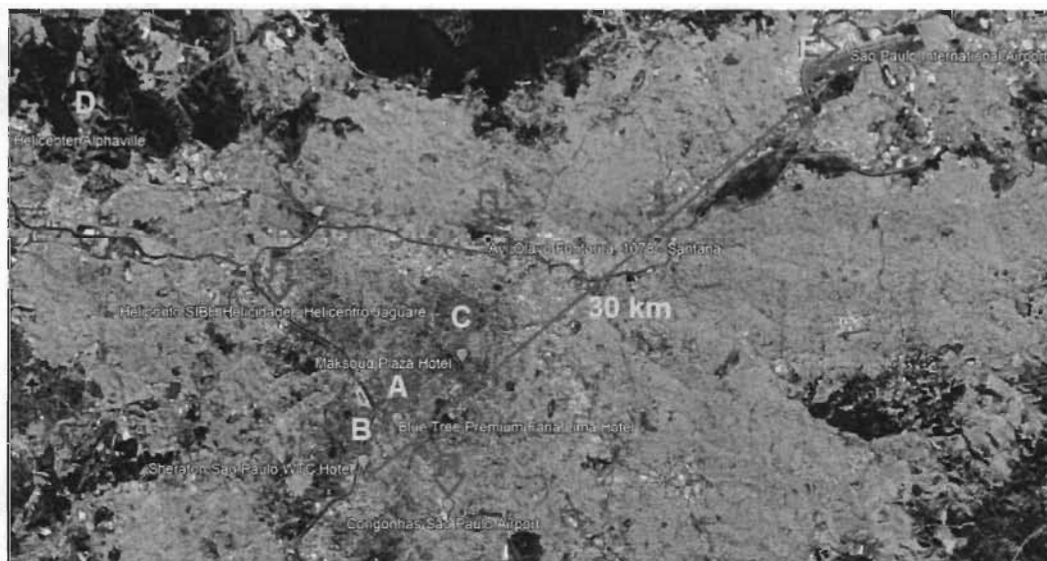


Figure 23. Hélicoptères/hélidecks de VOOM à São Paulo. La route principale est de Brooklin Paulista (São Paulo World Trade Center) à l'aéroport international de GRU. (adapté de google maps)

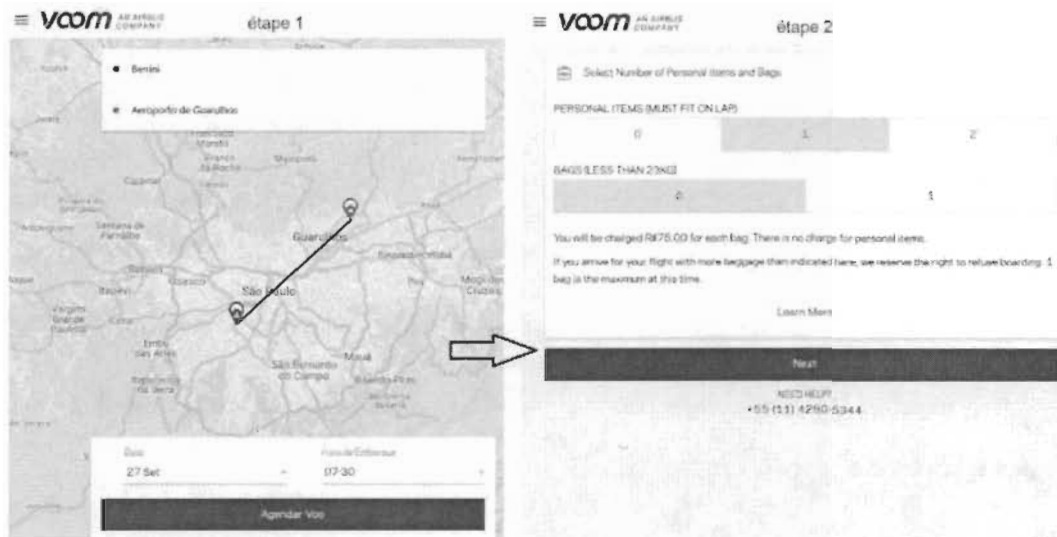


Figure 24. Étapes pour réserver un vol d'hélicoptère ODM avec VOOM à São Paulo.

(images de site web VOOM)



Your Journey Estimate

What To Bring With You

Please remember to bring your Passport or ID with you to the helipad. You will need to show it to a security officer before your flight.

Boarding Time

September 26, 2018 3:30 PM

Origin Helipad

Berrini

Sheraton São Paulo WTC Hotel - Av. das Nações Unidas, 12559 - Cidade Monções, São Paulo



The Sheraton São Paulo WTC helipad is located at Av. das Nações Unidas, 12559. Upon arrival, please proceed to the hotel lobby. Once there, please introduce yourself at the reception desk as a Voom passenger. You will then be escorted to the reception area. Please plan on arriving 15 minutes prior to your scheduled departure.

Destination Helipad

Aeroporto de Guarulhos

Rod. Hélio Smidt, s/nº - Cumbica, Guarulhos - SP, 07190-100



We will arrange a private shuttle that will take you to the passengers terminal. Note that the journey may take around 15 minutes so please arrive in advance.

Figure 25. Confirmation d'un vol d'hélicoptère ODM avec VOOM à São Paulo.
(images de site web VOOM)

2.9. L'impact des hélicoptères dans l'environnement urbain

Comme on peut le constater, l'hélicoptère (un type d'aéronef VTOL) joue un rôle important dans la mobilité aérienne urbaine de São Paulo (comme dans d'autres grandes métropoles du monde), avec une flexibilité inégalée. Outre les taxis aériens, des hélicoptères sont également utilisés pour les opérations de sauvetage, le maintien de l'ordre, les ambulances aériennes, entre autres services importants. À titre d'exemple d'application para-publique, le groupe de patrouille aérienne de la police militaire de São Paulo exploite aujourd'hui une flotte de 27 hélicoptères (01 HB350B, 01 AS350BA, 21 AS350B2, 02 Schweizer 269C-1, 01 EC135 et 01 AW109 Grand New) (Pilotopolicial, 2017).

Mais l'impact de l'hélicoptère en milieu urbain n'est pas toujours positif. Si on les compare aux vols de l'aviation commerciale (partie 121), qui dépendent des aéroports pour opérer (avec des avions de décollage et d'atterrissage conventionnels / CTOL: conventional take-off and landing), les numéros de service de taxi aérien pour hélicoptère sont encore faibles. Mais, ces vols se popularisant et se déroulant en milieu urbain (ou interurbain), volant à basse altitude, fonctionnant avec des héliports installés au-dessus des bâtiments (ou à proximité de ceux-ci), la montée en puissance des opérations par hélicoptère devient un important aspect de la vie de la population de ces villes, notamment en ce qui concerne le bruit et la pollution atmosphérique générés. Par conséquent, des solutions alternatives doivent être étudiées, développées et déployées afin de contribuer à la durabilité globale de la mobilité aérienne en milieu urbain. C'est dans

ce contexte que les solutions UAM basées sur la propulsion électrique, comme eVTOL, peuvent éventuellement jouer un rôle majeur.

2.10. L'expérience pionnière de New York avec des hélicoptères au service de l'UAM

La ville de New York a été un pionnier dans l'utilisation du vol vertical pour éviter les rues encombrées aux personnes prêtes à payer le prix (suivies de San Francisco, Los Angeles et Chicago). À compter de 1953, New York Airways (Dajani, Stortstrom, & Warner, 1977) assurait un service de navette régulier par hélicoptère. Les hélicoptères opéraient depuis des héliports construits au sommet des immeubles du centre-ville de Manhattan et dans les principaux aéroports de la région. Le plus important des héliports était situé au sommet du bâtiment Pan Am (200 Park Avenue, East 45th Street, New York) et relié aux principaux aéroports de New York (JFK, La Guardia et Newark) selon des horaires réguliers. Cette héliport avait aussi une caractéristique très importante, car le bâtiment Pan Am était juste au-dessus de la gare centrale de New York, un centre de concentration majeure pour la connexion au transport terrestre (métro, train, bus, taxi). Les passagers pourraient donc prendre l'hélicoptère à bord du J.F.K. aéroport, arriver au centre-ville de Manhattan après seulement 15 minutes et choisir simplement le métro pour vous rendre à leur destination finale (Dajani et al., 1977).

New York Airways exploitait une flotte d'hélicoptères monomoteurs et bimoteurs (Sikorsky S-55, S-58, Boeing Vertol V-44, Boeing Vertol 107-II et Sikorsky S61) pouvant accueillir jusqu'à 28 passagers (Vertol 107-II). Les opérations régulières de transport de passagers à New York étaient si constantes qu'il transportait environ 342 000 passagers et volait 580 000 km par an en 1974 (Dajani, Warner, Epstein, & O'Brien, 1976).

Mais, en 1977, un accident a suscité des doutes sur les aspects de sécurité liés à l'utilisation d'hélicoptères, en particulier d'hélicoptères lourds comme le S-61, avec des héliports situés au sommet des bâtiments. Le 16 mai 1977, un hélicoptère S-61L effectuant un vol régulier (numéro de vol 972) entre le bâtiment Pan Am et l'aéroport J.F.K. a subi un accident qui a entraîné la mort de 5 personnes. L'hélicoptère a atterri dans l'héliport, le rotor tournant dans l'embarquement, lorsqu'une défaillance catastrophique s'est produite sur l'un de ses principaux trains d'atterrissage. L'appareil a soudainement basculé sur le côté et les pales du rotor ont touché le sol, faisant quatre victimes à l'embarquement. Des pales de rotor ont été projetées du haut du bâtiment, tuant une personne au rez-de-chaussée et endommageant des voitures garées à proximité. Après une période d'enquête menée par le Office National de la Sécurité des Transports (NTSB : National Transportation Safety Board), les opérations de l'héliport Pan Am ont repris, mais ont été rapidement fermées la même année. La crise de l'essence à la fin des années 70 ainsi que son activité financièrement marginale ont entraîné la faillite de New York Airlines en 1979 (Dajani et al., 1977). Des opérations similaires ont été

tentées à San Francisco, Los Angeles et Chicago, dans les années 1960 et 1970, mais elles ont toutes été déclarées en faillite dans les années 1970 pour ne pas réaliser une opération rentable (Dajani et al., 1977).

La réglementation municipale a interdit les opérations des hélicoptères sur le toit à New York (Peisen & Lobosco, 1991) principalement en raison de l'accident survenu avec New York Airlines, limitant les opérations de décollage et d'atterrissage aux héliports situés sur les rives de la rivière Hudson. Cette décision, prise en priorité pour des raisons de sécurité, vise à éviter qu'un accident comme celui du vol 972 puisse atteindre une plus grande proportion en tuant des personnes dans les rues achalandées de New York. Ce type de réglementation (réglementations locales) peut également constituer un défi de taille pour toute application future du concept eVTOL UAM dans des villes surpeuplées telles que New York.



Figure 26. L'accident du New York Airways vol 972t sur l'hélicoptère sur le toit du bâtiment Pan Am

(crédits d'image: Dan Farrell, NY Daily News)

Dans les années 1980, Donald Trump, de la compagnie Trump Air (helis, 2018), tentait une nouvelle expérience de transport régulier par hélicoptère. Il exploitait 3 Sikorsky S-61 et 2 Boeing Vertol 234 Chinook, avec des liaisons régulières entre l'aéroport de La Guardia et Wall Street Hélicoptère (près de la rivière Hudson). Trump Air a duré de 1989 à 1992, date à laquelle il a été fermé en raison de la non-rentabilité de ses activités.



Wall St. To LaGuardia In Six Minutes.

The Trump Shuttle Connection™ provides quick and convenient helicopter service between LaGuardia Airport and the Wall St. area. Leaving from the Wall St. Heliport, our helicopter arrives at the Trump Shuttle Terminal in just six minutes. There, you can easily connect with The Trump Shuttle to Boston or Washington.

The Trump Shuttle Connection Schedule

All flights Monday - Friday. Call 1-800-247-8796 for reservations.

Wall St. Heliport to LaGuardia		The Trump Shuttle Terminal to the Wall St. Heliport	
7:00am	2:30pm	8:00am	2:15pm
8:30am	3:30pm	9:15am	4:15pm
9:30am	4:30pm	10:15am	5:15pm
10:30am	5:30pm	11:15am	6:15pm
	6:30pm		

Service effective Oct. 4, 1989. Schedule subject to change without notice.

Figure 27. Prospectus de Trump Shuttle, de 1989, avec horaire de vol régulier.
(crédits d'image: reproduction du prospectus de 1989)

À partir de 2015, Blade (www.flyblade.com), qui propose le service de navette en hélicoptère depuis les héliports de la rivière Hudson vers les aéroports de New York et les Hamptons (zone résidentielle et de villégiature de grande classe au nord-est de New York). Blade utilise une plate-forme logicielle basée sur le Web et sur smartphone pour permettre aux clients de réserver des vols simples ou en covoiturage. Son concept est très similaire à celui offert par VOOM à São Paulo et à Mexico.

Mais les hélicoptères ne font pas l'unanimité à New York, car certains citoyens y voient un inconvénient, en particulier en ce qui concerne le bruit qu'ils génèrent. La prolifération des hélicoptères à New York, non seulement à cause de vols exécutifs ou à la demande, mais surtout de vols touristiques, a donné naissance à des groupes sociaux organisés qui tentent d'interdire les vols touristiques en hélicoptère (Stopthechpnyj.org, 2018) et aux législateurs locaux d'étudier l'interdiction complète des vols touristiques à New York (New York Post, 2018).

L'expérience new-yorkaise montre que l'impact des opérations d'hélicoptères dans les zones urbaines peut également être négatif (Amoroso et al., 2012), et les habitants de ces villes ont largement le sentiment que le bruit, la pollution atmosphérique et les aspects de sécurité de ces machines ne sont pas compatibles à son application massive en milieu urbain. En outre, la forte dépendance vis-à-vis des coûts des combustibles fossiles et les coûts de maintenance élevés des hélicoptères rendent ces opérations très marginales sur le plan financier. Comme l'eVTOL ne repose pas sur des combustibles fossiles et que les coûts de l'électricité ont tendance à être plus prévisibles et abordables que les dérivés de pétrole, l'eVTOL se substitue parfaitement aux hélicoptères dans les opérations aériennes en milieu urbain.

3. METHODOLOGIE

Afin de remplir les objectifs présentés au point 1.4, il a été utilisé les concepts présentés dans la revue de littérature pour réaliser une étude de cas, en utilisant São Paulo (Brésil) comme scénario pour une opération initiale eVTOL en tant qu'aéronef ODM / UAM. Les critères choisis pour évaluer son adéquation sont décrits ci-dessous.

3.1. Les villes idéales pour server de projets pilotes

UBER est actuellement à la recherche de sa première ville de lancement (en dehors des États-Unis) pour commencer les essais eVTOL de son futur service ODM / UAM, appelé UBER Air. Ces essais devraient commencer en 2020 (Uber, 2016) et viseront à:

- Valider le concept d'opérations (CONOP);
- Augmenter le niveau de maturité technologique (TRL : Technology Readiness Level) des aéronefs avant le déploiement à grande échelle et l'intégration de ces véhicules dans l'espace aérien urbain;

Los Angeles et Dallas, toutes deux situées aux États-Unis, ont déjà été sélectionnées comme les deux premières villes à bénéficier de ces essais.

Il est important d'attirer l'attention sur le fait que les aéronefs eVTOL doivent être certifiés avant de commencer des opérations commerciales en vertu de la réglementation de la partie 135 (transport de passagers payants) (FAA, 2018b). En conséquence, UBER envisage de lancer l'exploitation commerciale du service ODM / UAM d'UBER Air en 2023, au moment où il s'attend à recevoir la

certification de type de l'aéronef devant être utilisé pour ces opérations. Donc, les premiers essais prévus pour 2020 ne pourraient être exécutés qu'avec une autorisation de vol expérimental (autorisation qui autorise les vols, mais uniquement à des fins de développement, sans passager payant).

São Paulo (Brésil) figure dans la liste des premières villes à être la première ville internationale (c'est-à-dire hors des États-Unis) à avoir participé aux essais UBER Air en 2020 (ZDNet, 2018) (Uber, 2018b). Et plusieurs raisons font que São Paulo est un choix idéal pour cette mission. Ces raisons seront analysées plus loin dans ce document.

UBER a publié récemment (août 2018), lors de l'exposition *Uber Elevate Asia-Pacific* à Tokyo, avec la liste restreinte des pays susceptibles de bénéficier des essais, les caractéristiques qui, à leur avis, constitueraient une ville candidate idéale (The Vertical Flight Society, 2018d). Ces caractéristiques seront considérés comme les exigences minimales de faisabilité du marché que la ville choisie doit posséder pour pouvoir absorber un service perturbateur comme UBER Air. Les villes capables de bénéficier des essais UBER Air seront probablement les premiers marchés à lancer le service commercial en 2023.

On peut dire que ces caractéristiques, considérées par UBER comme idéales pour le lancement d'UBER Air, seraient très similaires pour tout autre concurrent sur le marché des ODM / UAM. Par conséquent, les considérations et les conclusions peuvent également être valables pour les futurs concurrents d'UBER dans ce type d'opérations.

Aux fins de la faisabilité du marché, dans le cadre simplifié de ce mémoire, ces caractéristiques ont été considérées comme celles à prendre en compte et à analyser.

Le Tableau 3 présente un extrait de ce qui était considéré comme les caractéristiques les plus importantes (The Vertical Flight Society, 2018d).

Tableau 3. Caractéristiques requises par UBER pour que la ville idéale reçoive les essais UBER Air eVTOL en 2020.

#	Caractéristiques
1	“Villes avec une population de plus de 2 millions d’habitants dans la région métropolitaine et une densité de plus de 2 000 habitants par mile carré”
2	“Polycentrique, avec de multiples nœuds de développement denses dans une zone urbaine et confronté à une congestion importante du trafic”
3	“La présence d’un grand aéroport à proximité, où le trajet peut souvent prendre plus d’une heure du centre-ville à cause de la distance, de la demande ou de goulots d’étranglement (ponts, tunnels, etc.)”
4	“il est essentiel qu’il puisse être intégré dans une solution multimodale incluant d’autres options”
5	“avoir des conditions environnementales stables et favorables qui conviennent bien aux opérations aériennes, notamment l’absence de conditions météorologiques, de températures et d’altitude extrêmes”
6	“un réseau électrique robuste alimenté par une énergie à faible intensité de carbone. L’engagement d’une ville à réduire son empreinte carbone et à investir dans la technologie de modernisation du réseau est essentiel. ”
7	“La philosophie des approches réglementaires progressives sur les nouvelles technologies de la mobilité telles que le covoiturage, les vélos sans quai, les véhicules autonomes et les drones est très valorisée”

Les prochaines sections de ce “mémoire” ont pour objectif d’analyser les raisons pour lesquelles São Paulo conviendrait parfaitement aux premiers essais de services ODM / UAM, conformément aux caractéristiques énumérées dans le Tableau 3.

4. RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

4.1. São Paulo et la vision d'UBER pour une ville idéale pour la première application eVTOL

Comme le montre le Tableau 3, UBER a répertorié une série de caractéristiques selon lesquelles une ville doit être considérée comme idéale pour la mise en œuvre des premières opérations eVTOL ODM / UAM. Aux fins du présent mémoire, la liste des caractéristiques d'UBER sera considérée comme un filtre préliminaire de faisabilité du marché. Cette section analysera chacun d'entre eux et exposera la conformité de São Paulo à ceux-ci.

#1 – “Villes avec une population de plus de 2 millions d'habitants de la région métropolitaine et une densité de plus de 2 000 habitants par mile carré”

Si l'on considère uniquement la municipalité de São Paulo, sa population est d'environ 11 253 503 habitants, avec une densité de population de 19 316 hab / mi² (Prefeitura de São Paulo, 2010).

#2 - “Polycentrique, avec de multiples nœuds de développement denses dans une zone urbaine et confronté à une congestion importante du trafic”

Comme on peut le voir à la section 2.6, les problèmes d'encombrement du trafic sont énormes à São Paulo et à RMSP, et ces points d'encombrement ne se concentrent pas dans une seule région. La répartition géographique du RMSP présente plusieurs pôles de développement régional autour de São Paulo, répartis

dans 5 sous-régions principales (voir Tableau 4), totalisant environ 21,4 millions d'habitants (y compris São Paulo). Les déplacements des travailleurs entre les différentes municipalités de RMSP sont considérables et génèrent des points de congestion aux heures de pointe sur les principales voies d'accès entrant et sortant de la ville.

Tableau 4. Principaux nœuds de développement régional autour de São Paulo, dans la RMSP et ses municipalités. (EMPLASA, 2018)

Subregion	Les municipalités
Nord	Caieiras, Cajamar, Francisco Morato, Franco da Rocha e Mairiporã.
Est	Arujá, Biritiba-Mirim, Ferraz de Vasconcelos, Guararema, Guarulhos, Itaquaquecetuba, Mogi das Cruzes, Poá, Salesópolis, Santa Isabel e Suzano.
Sud-est	Diadema, Mauá, Ribeirão Pires, Rio Grande da Serra, Santo André, São Bernardo do Campo e São Caetano do Sul.
Sud-ouest	Cotia, Embu das Artes, Embu-Guaçu, Itapeçerica da Serra, Jujuitiba, São Lourenço da Serra, Taboão da Serra e Vargem Grande Paulista.
Ouest	Barueri, Carapicuíba, Itapevi, Jandira, Osasco, Pirapora do Bom Jesus e Santana de Parnaíba.

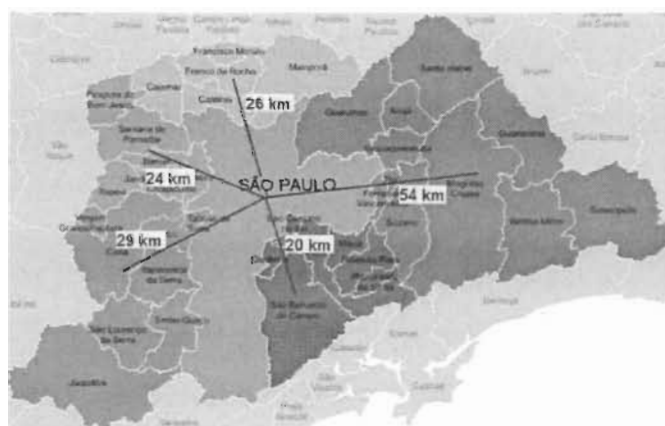


Figure 28. Les principaux nœuds de développement régionaux sont géographiquement répartis dans RMSP, occupant une superficie considérable.

(crédits d'image: adapté de Emplasa)

#3 - “La présence d'un grand aéroport à proximité, où le trajet peut souvent prendre plus d'une heure du centre-ville à cause de la distance, de la demande ou de goulots d'étranglement (ponts, tunnels, etc.)”

São Paulo respecte cette caractéristique, décrite à la section 2.6 et figure à la Figure 21, concernant l'aéroport international de São Paulo / Guarulhos (GRU). L'aéroport de Campinas (aéroport international de Viracopos), situé à environ 100 km au nord-ouest de São Paulo, est un autre choix d'aéroport très utilisé par la population de São Paulo, avec environ 9,3 millions de passagers annuels (Viracopos Aeroportos Brasil, 2018). Un trajet du centre-ville de São Paulo (région de Brooklin Paulista) à l'aéroport de Campinas prend entre 1,5 heure et 2 heures aux heures de pointe.

#4 - “il est essentiel qu'il puisse être intégré dans une solution multimodale incluant d'autres options”

Bien que ses problèmes de circulation résultent directement de la population et du nombre excessifs de véhicules au sol, associés à un système de transport en commun qui nécessite plus d'investissements pour répondre aux besoins de la ville, São Paulo possède un système de transport multimodal qui mélange métro, train et les autobus. Si nous considérons le centre financier de São Paulo, qui est bien desservi par les moyens de transport en commun, l'intégration avec d'autres moyens de transport alimentant les vertiports eVTOL serait garantie.



Figure 29. Station de train métropolitain Berrini, à Brooklin Paulista, partie du réseau de métro et de train métropolitain de São Paulo.

(crédits d'image: google maps)

#5- “ avoir des conditions environnementales stables et favorables qui conviennent bien aux opérations aériennes, notamment l'absence de conditions météorologiques, de températures et d'altitude extrêmes”

Le climat de São Paulo est de type humide subtropical, classé comme CFA selon la classification climatique de Köppen-Geiger (Kottek, Grieser, Beck, Rudolf, & Rubel, 2006). Les températures sont modérées, avec une moyenne annuelle de 20,1 ° C, une moyenne maximale de 25,7 ° C et une moyenne minimale de 16,2 ° C. La station des pluies est l'été et l'hiver est pluviométrique, avec des précipitations annuelles moyennes de 1 441 mm (INMET, 2018).

São Paulo est situé sur un plateau (*Planalto Cristalino*) à une altitude d'environ 3 000 mètres (de Almeida, 1974). Dans la zone urbaine, les variations d'altitude

sont faibles et l'absence de montagnes, sauf dans la direction des parcs Cantareira et Jaraguá, jusqu'à la limite nord de la région métropolitaine.

Il est possible de dire que le climat et la géographie de São Paulo sont extrêmement favorables aux applications aéronautiques.

#6- “un réseau électrique robuste alimenté par une énergie à faible intensité de carbone. L'engagement de la ville à réduire son empreinte carbone et à investir dans la technologie de modernisation du réseau est essentiel.”

Le Brésil a une longue tradition d'expérimentation et d'adoption de sources d'énergie verte et renouvelable. En 2002, environ 90% de toute l'électricité utilisée au Brésil était générée par des centrales hydroélectriques (ANEEL, 2008), ce chiffre est tombé à environ 74% en 2008, principalement en raison d'investissements urgents nécessaires pour accroître la production d'énergie électrique pendant la forte expansion économique du Brésil (2004-2014). Et comme les investissements dans les centrales hydroélectriques ont été lents à se concrétiser, des générateurs alternatifs de gaz naturel et de biomasse ont été mis en place. Le Brésil fait de nouveaux investissements dans l'énergie hydroélectrique, ce qui tend à accroître la participation de cette source d'énergie renouvelable. L'utilisation par le Brésil de sources d'énergie renouvelables pour son réseau électrique est considérée comme une expérience très positive, car des pays comparables, comme les États-Unis, ne produisent que 17% de leur énergie électrique à partir de sources renouvelables, dont 63% en brûlant du combustible

fossile (charbon, gaz naturel et pétrole) et 20% proviennent de centrales nucléaires) (eia, 2018).

Le RMSP est alimenté par plusieurs sous-systèmes électriques provenant de différentes régions du Brésil, qui font partie du Système National Intégré (SIN : Sistema Integrado Nacional), et dont l'électricité est estimée à au moins 50% d'origine hydroélectrique (Governo do Estado de São Paulo).

Il est également important de citer le programme pionnier en matière de biocarburants lancé par le Brésil en 1975, appelé pro-alcool. L'objectif de Pro-Álcool était de promouvoir l'utilisation de l'éthanol comme biocarburant pour l'industrie automobile brésilienne, en l'ajoutant à l'essence, puis au développement de moteurs brésiliens pouvant fonctionner à 100% à l'éthanol (Cortez, 2018). Les travaux de recherche du professeur Urbano Ernesto Stumpf (du CTA - Centro Técnico Aeroespacial), qui a inventé en 1975 le moteur à éthanol brésilien, le premier au monde capable de fonctionner à 100% sur l'éthanol, ont grandement contribué à l'initiative de Pro-Álcool (Cortez, 2018). Cette initiative a amené le Brésil à développer de manière continue son parc de voitures fonctionnant au biocarburant, qui ont joué un rôle important à plusieurs égards (moins de dépendance du pétrole importé, en particulier lors de la crise pétrolière des années 70/80 du 20ème siècle, et moins de pollution) à l'économie de la nation. En 2003, une autre invention brésilienne a révolutionné le marché automobile brésilien et se propage rapidement à l'international: les moteurs polycarburant, qui peuvent être alimentés à n'importe quelle proportion d'essence / éthanol, avec des réglages

totallement automatiques du système d'injection électronique. Aujourd'hui, plus de 80% des voitures vendues au Brésil sont polycarburant et environ 75% de toutes les voitures circulant dans les rues brésiliennes sont polycarburant (Epe, 2013).

L'administration municipale de la ville de São Paulo, préoccupée par les niveaux de pollution générés par le trafic intense de véhicules à moteur (voir 2.6), a également pris des initiatives pour réduire la contribution négative des bus à la pollution. Un parc croissant d'autobus utilisant l'éthanol comme biocarburant est utilisé dans la ville depuis 2009 (Janssen et al., 2010) (G1, 2011) (bien que petit, l'idée est de prouver le concept selon lequel l'éthanol peut être utilisé efficacement par véhicules lourds), le nombre d'autobus électriques est passé à environ 200 et une loi municipale a été approuvée (Câmara Municipal de São Paulo, 2018) obligeant le parc d'autobus de São Paulo à réduire de 95% les émissions de CO² en 20 ans à compter de 2018. Bien que ces objectifs puissent sembler difficiles à atteindre, ils indiquent un désir et une préoccupation positifs de la part des administrations locales de réduire l'impact de la pollution générée par les voitures dans l'environnement.

Nous pouvons dire que le Brésil, et particulièrement São Paulo, sont très désireux de mettre en œuvre des initiatives et des idées pour réduire l'impact environnemental des transports et améliorer l'utilisation des sources d'énergie renouvelables. Et c'est exactement l'idée de la propulsion électrique utilisée sur les aéronefs eVTOL.

Il est intéressant de noter que l'électricité utilisée pour alimenter les véhicules électriques (voitures électriques ou futurs aéronefs eVTOL) aux États-Unis provient à 63% de la combustion de carburants fossiles. En ce qui concerne l'utilisation des véhicules électriques aux États-Unis, une étude spécifique pourrait être réalisée pour déterminer quelle option est la plus éco-efficace sur le plan de l'environnement, entre les deux options suivantes:

1- brûler des combustibles fossiles pour générer de l'électricité, les transmettre via le réseau public, faire face à toutes les pertes de ce processus et enfin recharger les véhicules électriques, ou

2- brûlez simplement le carburant fossile directement dans les moteurs du véhicule (en utilisant des moteurs à combustion interne conventionnels);

À São Paulo, l'électricité devant servir à recharger l'avion eVTOL sera essentiellement issue de sources renouvelables (comme l'énergie hydroélectrique), solution beaucoup plus durable sur le plan de l'environnement.

#7 – “La philosophie des approches réglementaires progressives sur les nouvelles technologies de la mobilité telles que le covoiturage, les vélos sans quai, les véhicules autonomes et les drones est très valorisée”

En 2018, la municipalité de São Paulo a approuvé des lois visant à orienter et à réglementer les services de vélos partagés dans la ville (Prefeitura de São Paulo, 2017). Des notes techniques ont été publiées par l'administration municipale afin de promouvoir ce service, qui est considéré comme important en raison du potentiel

de contribution à la réduction de la pollution émise par les voitures et les bus. Ces services seront intégrés dans un réseau de voies exclusives pour la circulation des vélos. Un total d'environ 80 000 vélos sera inséré dans l'environnement de la ville en 2018 afin de concourir pour ce type de service (Vádebike.org, 2018).

Les véhicules terrestres autonomes sont encore une réalité lointaine au Brésil, en particulier dans une ville comme São Paulo où le trafic au sol est très complexe, même pour les conducteurs humains. Nous n'avons trouvé aucune référence à des projets sur la mise en place de véhicules terrestres autonomes à São Paulo lors de la rédaction de ce "mémoire".

Les véhicules aériens autonomes devant être utilisés dans les zones urbaines sont également exclus de le proche avenir de l'Agence de l'aviation civile du Brésil (ANAC). On peut s'attendre à ce que l'opération initiale d'eVTOL au Brésil soit pilotée par des pilotes humains, au moins au cours des cinq premières années.

Quoi qu'il en soit, en raison des problèmes de circulation et de pollution à São Paulo, son administration adoptera probablement toute idée révolutionnaire susceptible de contribuer à réduire ces deux problèmes, et eVTOL UAM est l'une de ces possibilités.

4.2. Autres considérations sur São Paulo en tant que projet pilote pour le service ODM/UAM

Outre les sept caractéristiques énumérées par UBER, il sera également nécessaire qu'un partenariat stratégique fort soit établi entre la ou les sociétés qui

vont démarrer ce type d'opérations et les gouvernements fédéral et municipaux. Au niveau fédéral, où le certificat de type de l'aéronef sera délivré (par l'ANAC au Brésil), et au niveau municipal, où les autorités locales peuvent réglementer les types de trafic aérien autorisés sur les zones urbaines (comme on peut le voir dans le cas de New York, avec l'interdiction des opérations d'hélicoptère sur des héliports au-dessus des bâtiments (voir 2.10).

Une autre caractéristique très importante de la ville de São Paulo est sa proximité (environ 100 km) avec la ville de São José dos Campos, siège de la Empresa Brasileira de Aeronáutica (EMBRAER), fabricant aéronautique multinational brésilien. EMBRAER est l'un des partenaires d'UBER dans la conception, le développement et la certification (The Vertical Flight Society, 2018c) de son futur aéronef eVTOL, aux côtés de Pipistrel Aircraft, Aurora Flight Sciences, Karem et Bell (The Verge, 2018). Cette proximité permet aux équipes d'ingénierie d'EMBRAER d'intervenir rapidement lors de la première essais d'utilisation de l'aéronef. De plus, le fait d'utiliser un aéronef EMBRAER lors de l'obtention des autorisations nécessaires pour tester ce service à São Paulo pourrait constituer un atout politique important pour UBER.



Figure 30. EMBRAER eVTOL en développement pour UBER Air (un modèle hybride portance+croisière relativement simple).

(crédits d'image: communiqué de presse Embraer)

Les discussions sur les sept points ci-dessus permettent de conclure que la ville de São Paulo remplit les caractéristiques les plus importantes exigées par UBER pour être considérées comme un marché idéal pour le déploiement des premiers essais du service UBER Air ODM / UAM. Dans le cadre de ce "mémoire", une première opération pilote d'eVTOL à São Paulo répond bien à un critère préliminaire de faisabilité du marché.

4.3. Proposition de la première opération ODM/UAM eVTOL à São Paulo

Comme les services eVTOL ODM / UAM n'existent pas encore dans le monde, certaines hypothèses ont été réalisées pour ce service initial et sont répertoriées ci-dessous. Ces hypothèses visent à simplifier le scénario, car trop de variables peuvent influencer ce type d'opération et ont été collectées à partir

des meilleures informations disponibles. Ces hypothèses serviront de base aux CONOPs proposés pour la première opération eVTOL à São Paulo.

4.3.1. La décision entre ODM ou horaire fixe

Nous avons décidé d'utiliser un service régulier pour la première opération eVTOL à São Paulo (au lieu d'ODM), car il sera possible de mieux prévoir les temps d'utilisation et de maintenance des aéronefs. Le service régulier permettra également de vendre des billets comme sur une navette (covoiturage), en maximisant les taux d'occupation et en rendant les billets moins chers. Quoi qu'il en soit, il sera nécessaire que le client exécute l'intégralité du processus de réservation de billet à l'aide de l'application pour smartphone ou du site Web.

4.3.2. La route

L'itinéraire choisi est celui entre Brooklin Paulista (opérant depuis l'héliport situé sur le complexe WTC-World Trade Center) et l'aéroport de São Paulo / Guarulhos. Cette route serait appelée WTC-GRU (GRU-WTC dans la direction opposée).

Cette route a été choisie en tenant compte des hypothèses suivantes:

- Se concentrer initialement sur un public disposant d'un pouvoir d'achat élevé et pour qui le temps aurait plus de valeur que le prix du billet eVTOL;
- l'itinéraire doit avoir une demande suffisante dans les deux sens;

- les points de départ et d'arrivée doivent être bien alimentés par des moyens de transport terrestres (tels que des taxis, des bus, métro);

Cette route serait exploitée sous surveillance radar Helicontrol (voir 2.7) et toutes les opérations auraient besoin d'un plan de vol (un plan de vol est une communication établie entre l'exploitant et le contrôle de la circulation aérienne contenant des informations de base sur le vol, qui comprend au minimum: intention, route prévue, nombre de personnes à bord, endurance du carburant), conformément à la réglementation sur l'espace aérien de classe C (COMAER, 2016).

Afin de mieux s'intégrer aux réglementations de la circulation aérienne en vigueur dans cette phase initiale d'exploitation, il est proposé que l'eVTOL suive les mêmes itinéraires que les hélicoptères, tout en tirant parti de sa vitesse de croisière plus rapide.

La route suivrait les REH suivantes: Pinheiros-> Marte-> Ecológico (dans la direction GRU-WTC), volant à 1 000 pieds au dessus du sol (AGL: Above Ground Level) avec un total de 25 NM (~ 47 km) de distance au sol. Considérant un aéronef eVTOL volant à 240 km / h (numéro de référence suggéré par UBER "Exigences relatives aux véhicules eVTOL", 2018), un temps d'une minute pour les opérations de décollage et d'atterrissage (total 2 minutes), cet itinéraire serait complété en environ 14 minutes. Un concurrent direct de l'eVTOL, le très populaire hélicoptère R-44 Raven II, empruntant le même itinéraire (avec les

mêmes heures de décollage et d'atterrissage), devrait le compléter en 16 minutes, compte tenu de sa vitesse de croisière de 202 km / h, selon fabricant (Robinson Helicopter Company, 2018).

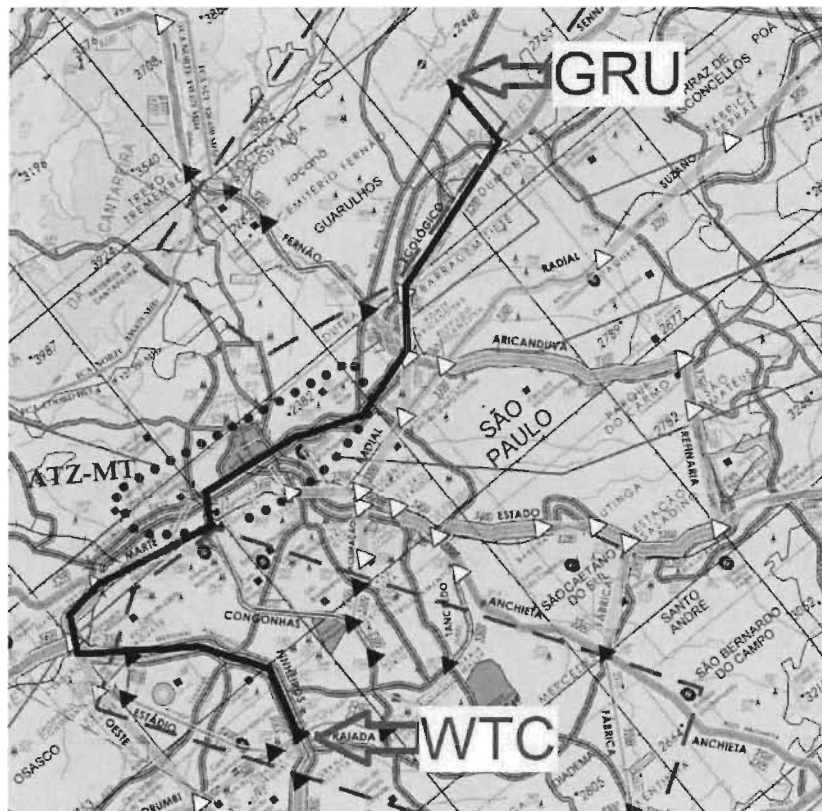


Figure 31. Route WTC-GRU (en noir), REH Pinheiros->Marte->Ecológico (~47 km).

(adapté de (ICA, 2018))

4.3.3. L'aéronef

Bien que la définition d'un type spécifique d'aéronef eVTOL soit difficile à établir en ce moment, compte tenu des différents concepts en cours de développement (voir 2.3), nous avons énuméré ci-dessous les principales

caractéristiques prises en compte par UBER "Exigences relatives aux véhicules et aux missions" (Uber, 2018a) pour un aéronef idéal pour les opérations initiales:

- Capacité de 3 ou 4 passagers + 1 pilote;
- Pour la version 4 passagers: charge utile de 500 kg;
- Pour la version 3 passagers: charge utile de 435 kg;
- Densité de la batterie: 300 Wh / kg;
- 15 dB plus silencieux que les hélicoptères légers existants;
- possibilité de rouler au sol sans tourner les rotors (roues motorisées);
- ne dépassant pas 45 pieds (13,7 mètres) pour sa dimension maximale;

En 2018, UBER a publié ce qu'ils ont appelé le Modèle De Référence Commun (CRM : Common Reference Model) afin d'aider le secteur à mieux converger vers ce qu'il considère comme un avion idéal pour les opérations UAM. Ce CRM est publié sur le site Web d'UBER (<https://www.uber.com/info/elevate/ecrm/>) et peut être téléchargé au format électronique ouvert de Bloc d'Esquisse de Véhicule (VSP : Vehicle Sketch Pad) (un type de fichier pouvant être ouvert sur les outils de simulation aérodynamique). La Figure 32 illustre ces concepts.

Il est intéressant de noter que les trois VSP décrivent les concepts Hybride Portance+Croisière. Une explication possible serait de chercher une conception ailée (pour améliorer l'efficacité globale) mais en maintenant les niveaux de

complexité de développement bas (pas de parties basculants). Ce serait l'idée d'une première opération et, bien entendu, des conceptions plus sophistiquées rejoindraient la flotte à l'avenir (rotor basculant, rotor+voilure basculantes, vecteur de poussée).



Figure 32. Concepts eCRM d'UBER pour l'appareil initial eVTOL.

(crédits d'image: UBER)

4.4. Le niveau TRL actuel de la technologie eVTOL

Le niveau de maturité technologique (niveau TRL) joue un rôle majeur dans l'analyse et la décision quant à la faisabilité de son utilisation dans un projet ou programme donné. Et c'est exactement le cas lorsqu'on examine si eVTOL (en fait, non pas une seule technologie, mais tout un ensemble de technologies, telles que la propulsion électrique, le vol vertical, les composants basculants, la propulsion électrique, etc.) est réalisable (prêt) pour application sur la mission UAM au lieu des hélicoptères.

L'échelle TRL a été créée par la Administration Nationale de l'Espace et de l'Aéronautique (NASA : National Aeronautics and Space Administration) dans les années 80 du 20ème siècle (Sausser, Verma, Ramirez-Marquez, & Gove, 2006) et constitue à présent un indicateur commun pour évaluer l'état de la maturité

(préparation) d'une technologie en cours de développement. Cette échelle est très utilisée dans les programmes de Recherche et Développement (R & D : Research and Development) et sera utilisée, de manière simplifiée, pour indiquer la faisabilité d'eVTOL pour les applications UAM. La version de l'échelle TRL à utiliser sera la version d'Agence Spatiale Européenne (ESA : European Space Agency) pour les produits aérospatiaux (TEC-SHS, 2008).

L'échelle TRL comprend 9 niveaux, le niveau 1 étant la maturité la plus basse (début de la recherche scientifique) et le niveau 9 la maturité la plus élevée (un produit ou un système aérospatial utilise avec succès la technologie dans des conditions opérationnelles réelles).

Après avoir analysé l'état actuel du développement de la technologie eVTOL et considéré que:

- il y a déjà des avions eVTOL en vol (habités) à des fins expérimentales;
- mais, les vols d'expérimentation n'ont pas été effectués dans l'environnement opérationnel réel (environnement urbain);

Il a été décidé de déclarer que le niveau TRL actuel d'eVTOL pour les applications UAM se situe au niveau TRL 6 (démonstration du modèle / prototype de système / sous-système dans un environnement pertinent - au sol ou dans l'espace). L'échelle TRL de l'ESA est présentée dans le Tableau 5.

Tableau 5. Niveaux TRL pour les produits aérospatiaux.
(source: ESA)

Niveau de maturité	Définition	Explication
TRL 1	Principes de base observés et rapportés	Niveau de préparation technologique le plus bas. La recherche scientifique commence à être traduite en recherche appliquée et développement.
TRL 2	Concept technologique et / ou application formulé	Une fois que les principes de base sont observés, des applications pratiques peuvent être inventées et la recherche et développement démarré. Les applications sont spéculatives et peuvent ne pas être prouvées.
TRL 3	Fonction critique analytique et expérimentale et / ou validation du concept caractéristique	Une recherche et un développement actifs sont lancés, y compris des études analytiques / de laboratoire pour valider les prévisions concernant la technologie.
TRL 4	Validation des composants et / ou de la maquette en environnement de laboratoire	Les composants technologiques de base sont intégrés pour établir qu'ils vont travailler ensemble.
TRL 5	Validation des composants et / ou de la carte dans l'environnement approprié	Les composants technologiques de base sont intégrés à des éléments de support raisonnablement réalistes, ce qui permet de les tester dans un environnement simulé.
TRL 6	Modèle ou démonstration de prototype de système / sous-système dans un environnement pertinent (au sol ou dans l'espace)	Un modèle représentatif ou un système prototype est testé dans un environnement pertinent.
TRL 7	Démonstration d'un prototype de système dans un environnement spatial	Un prototype de système qui est, près ou proche du système opérationnel prévu.
TRL 8	Système actuel terminé et "qualifié en vol" par des essais et des démonstrations (au sol ou dans l'espace)	Dans un système réel, il a été prouvé que la technologie fonctionnait sous sa forme finale et dans les conditions prévues.
TRL 9	Système actuel "éprouvé en vol" grâce à des opérations de mission réussies	The system incorporating the new technology in its final form has been used under actual mission conditions.

5. CONCLUSIONS

Le *convertiplane* VTOL est une solution technique en recherche et développement depuis longtemps. Mais, juste à la fin du 20ème siècle, les nouvelles technologies telles que les matériaux composites et les commandes de vol numériques (fly-by-wire) la rendaient pratique.

Au cours de la dernière décennie, les progrès de la propulsion électrique ont rendu possible le concept de l'eVTOL. Ces nouveaux types de véhicules aériens s'appuieront sur la propulsion électrique distribuée pour réaliser des aéronefs VTOL plus légers, moins complexes, plus sûrs et plus écologiquement durable. Les aéronefs eVTOL présentent de nombreux avantages par rapport à la conception classique de l'hélicoptère: ils ne génèrent aucune émission de gaz polluants en opération et sont peu bruyants. Ce sont les principales caractéristiques qui les rendent plus adaptés à une utilisation en milieu urbain.

Plusieurs entreprises (et même des agences gouvernementales) se bousculent pour développer et certifier les aéronefs eVTOL, afin de répondre aux besoins de mobilité aérienne urbaine. Cette ruée a été déclenchée par l'initiative *Elevate* d'UBER (Uber, 2016), qui donnait une vision claire du point de vue de la demande, grâce à la publication du article intitulé "Avance rapide vers un avenir du transport aérien urbain à la demande (Fast-Forwarding to a Future of On-Demand Urban Air Transportation)".

En ce moment, UBER réalise un étude pour choisir les villes de lancement de son service ODM / UAM UBER Air. UBER Air sera un service ODM / UAM basé sur un aéronef à propulsion électrique 100% VTOL (eVTOL). Selon UBER, trois villes doivent être choisies comme cas pilotes pour les premières expérimentations d'UBER Air. Dallas et Los Angeles ont déjà été choisies et São Paulo et Rio de Janeiro, au Brésil, font partie des candidats retenus dans le processus de sélection (ainsi que des métropoles au Japon, en Inde, en France et en Australie). Ce "mémoire" a analysé la faisabilité de la technologie eVTOL actuelle pour l'application UAM, avec trois axes d'étude: Technologie, Régulation et Marché, et a spécifiquement abordé la ville de São Paulo (Brésil), et sa faisabilité comme un cas possible pour exploitation initiale d'un service eVTOL ODM / UAM pour UBER (ou toute autre entreprise ODM / UAM future).

5.1. Technologie

Les véhicules eVTOL en développement dans le moment varient beaucoup dans leurs choix de conception. Ces choix peuvent affecter de manière significative leur complexité, leurs performances et leurs possibilités de certification. Les multicopters sont les types de conception les plus simples à construire et à prototyper. Ils offrent les meilleures performances en vol stationnaire, mais paient d'énormes pénalités en phase de croisière du vol (comme le font les hélicoptères). Les convertiplanes (concepts ailés) présentent plus de complexité dans leur conception, principalement en raison des composants basculants, mais présentent

les meilleures performances en phase de croisière, en raison de l'utilisation des voilures pour générer 100% de la portance.

Le texte présente des exemples de chacun des cinq types principaux d'eVTOL (multicopters, hybride portance+croisière, rotor basculant, voile+ rotor basculantes et vecteur de poussée) en cours de développement pour répondre aux exigences d'un aéronef 100% électrique VTOL et a comparé leurs principaux caractéristiques. Les recherches permettent de conclure que:

- Les aéronefs eVTOL sont conçus pour être beaucoup plus sûrs et efficaces que les hélicoptères, principalement grâce à l'utilisation de la technologie DEP. Le DEP permet l'utilisation de plusieurs moteurs électriques, en répartissant la portance / la poussée le long de l'aéronef vers la position où ils sont nécessaires. De plus, dans le cas de pannes de moteur uniques ou même multiples, les performances ne seront dégradées que progressivement, la contrôlabilité sera compensée par le système de commandes de vol numérique (fly-by-wire) et les effets sur la sécurité auront tendance à être mineurs (en fonction du choix de la conception et du niveau de défaillance du système). ;
- Le principal inconvénient de la technologie eVTOL est l'endurance de l'appareil, qui est relativement courte, en raison de la faible densité énergétique des batteries actuellement disponibles (comparé à un carburant fossile, comme le kérosène). Cependant, une courte endurance ne sera probablement pas une raison pour empêcher que la technologie eVTOL ne

devienne pratique, car elle est principalement destinée aux déplacements sur de courtes distances à l'intérieur des périmètres urbains ou à des trajets courts pour les navettes;

- Bien que tous les concepts techniques présentés conviennent à la mission UAM, les conceptions ailées sont plus efficaces en vol de croisière et peuvent atteindre des vitesses plus élevées. Mais, ces avantages peuvent ne pas être perçus lors de très courts trajets;
- UBER a publié trois concepts d'un avion adapté à la première utilisation d'eVTOL en tant que véhicules ODM / UAM. Tous sont des concepts Hybride portance+croisière. Une explication possible serait de chercher une conception ailés (pour améliorer l'efficacité globale) mais en maintenant les niveaux de complexité de développement bas (pas de composants basculants). Ce serait l'idée d'une première opération et, bien entendu, des conceptions plus sophistiquées rejoindraient la flotte à l'avenir (rotor basculant, voilure+ rotor basculantes et vecteur de poussée);
- Le concept eVTOL est réalisable, plusieurs prototypes étant déjà en vol et certains d'entre eux ayant effectué de nombreuses heures d'essais en vol. Le TRL actuel de la technologie était considéré comme de niveau 6 et progressait rapidement;

5.2. Réglementaire

Le principal défi réglementaire pour la mise en service de ces aéronefs est considéré (par l'auteur) comme le processus de certification. Comme il n'existe pas d'exigences claires en matière de certification civile pour les aéronefs VTOL ou eVTOL, il est nécessaire que chaque constructeur se mette d'accord avec les agences nationales de certification (telles que la FAA, l'EASA, l'ANAC et la TCCA) des exigences à satisfaire et des moyens de démontrer la conformité (puisque dépend fortement de la conception choisie, par exemple, ailés, non-ailés, rotors / ailes basculants, etc.). Cependant, l'industrie et les autorités déploient des efforts considérables pour trouver une base commune permettant de certifier ces aéronefs à des fins civiles. La partie 21.17 (b) de la 14 CFR (classe spéciale d'aéronefs), ainsi que l'amendement 64 de la FAR 23 ou l'amendement 5 de la CS 23 peuvent servir de point de départ pour la base de certification de certains de ces véhicules (conceptions ailés, ou convertiplanes). La conception multicopter est encore orpheline en ce qui concerne la base de certification.

Par conséquent, les conceptions eVTOL demandant la certification avec une approche de la Part 23 / amendement 64 (possible pour les conceptions ailés), peut demander une classification dans la classe spéciale (21.17 (b)), sont plus susceptibles d'obtenir la certification plus rapidement que la méthode de les aéronefs classifié comme partie 27 (comme le cas pour les multicopters). Mais les multicopters tirent parti de leur conception relativement plus simple (en raison de l'absence de composants basculants) pour piloter des prototypes et mener des

campagnes d'essais en vol plus rapidement que les conceptions ailés. Et cette conclusion est renforcée par le fait que E-Hang et Volocopter volent déjà leurs prototypes habités depuis plusieurs années et avec des campagnes de tests en vol en cours.

Il est possible de conclure qu'une base réglementaire pour la certification des aéronefs eVTOL est en cours d'élaboration rapide, avec la participation et la coopération de l'industrie et des autorités de certification. Par conséquent, les recherches effectuées permettent de conclure que la certification de ces aéronefs est réalisable et qu'elle n'est qu'une question de temps, alors que cette base réglementaire est en cours de négociation avec les autorités de certification.

5.3. Le marché

L'analyse de faisabilité du marché a été réalisée sur la base des critères d'UBER relatifs à une ville idéale (marché) afin de lancer un premier service ODM / UAM d'UBER Air. Ces critères sont résumés dans le Tableau 3 et portent sur la demande potentielle du marché et sur les conditions à favoriser pour ce type de service.

La ville de São Paulo (Brésil) a été présentée comme un cas initial idéal, qui correspond aux critères d'UBER, notamment en ce qui concerne les points suivants:

- La solution ODM UAM existante, explorée par VROOM, une filiale d'Airbus, mais fonctionnant avec des hélicoptères, est bien intégrée au contrôle du trafic aérien de la ville;
- Un espace aérien bien organisé avec un contrôle du trafic aérien dédié aux hélicoptères (Helicontrol, premier du genre au monde), qui peut également être utilisé pour une opération pilote eVTOL;
- Une ville avec un marché potentiel prometteur, principalement dû à:
 - o énormes problèmes de circulation au sol;
 - o réseau relativement petit de métro et de transport à grande vitesse / grande capacité;
 - o marché potentiel important, avec plus de 21,4 millions d'habitants dans le RMSP et un PIB équivalent à 256 milliards de dollars américains;
 - o un aéroport très important (aéroport international de São Paulo / Guarulhos) qui, bien que relativement proche de la ville, peut prendre près de 2 heures pour être atteint du centre financier de São Paulo, en raison des embouteillages aux heures de pointe;
- Une approche réglementaire progressiste et une volonté forte des autorités municipales et de la population de trouver des solutions permettant de réduire la pollution générée par les transports;
- Une longue tradition d'innovation en matière d'utilisation de bio carburants, tels que l'éthanol, à São Paulo et au Brésil dans son ensemble;

- Des conditions environnementales stables et favorables, considérées comme adéquates pour les opérations aériennes;
- Un réseau électrique basé principalement sur des sources renouvelables (énergie hydroélectrique), à la différence d'autres villes potentielles (principalement aux États-Unis) qui dépendent de combustibles fossiles ou de l'énergie nucléaire pour produire de l'électricité;

Les recherches effectuées permettent de conclure que São Paulo remplit les critères définis par UBER en tant que ville idéale pour le lancement d'un premier service ODM / UAM d'UBER Air. Ces critères ont été considérés comme les critères de faisabilité du marché, dans le cadre de ce mémoire.

Une suggestion de CONOPs (Concept of Operations) a été proposée pour un premier service eVTOL UAM à São Paulo, avec une route à double sens depuis le centre financier de São Paulo et l'aéroport international de São Paulo / Guarulhos.

RÉFÉRENCES

- ABRAPHE. (2013). Associação Brasileira de Pilotos de Helicóptero. Estudo da Abraphe confirma São Paulo como capital mundial do helicóptero. Retrieved from <http://www.abraphe.org.br/estudo-da-abraphe-confirma-sao-paulo-como-capital-mundial-do-helicoptero/>
- Amoroso, S., Castelluccio, F., & Maritano, L. (2012). *Helicopter operations: the environmental impact and ground facilities. Procedures and operational standards for the system's acceptance*. Paper presented at the 4th International Conference HELI World 2012: Helicopter Technologies and Operations.
- ANEEL. (2008). *Atlas da energia elétrica do Brasil 3a edição, Agencia Nacional de Energia Elétrica*. Retrieved from <http://www2.aneel.gov.br/arquivos/pdf/atlas3ed.pdf>
- Assunção, H. R. J. V. d. (2005). Transport air pollution in São Paulo, Brazil: advances in control programs in the last 15 years. *WIT Transactions on State of the Art in Science and Engineering, Vol 22*, 107-125.
- Borer, N. K., Patterson, M. D., Viken, J. K., Moore, M. D., Bevirt, J., Stoll, A. M., & Gibson, A. R. (2016). *Design and performance of the NASA SCEPTOR distributed electric propulsion flight demonstrator*. Paper presented at the 16th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations Conference.
- Brito, J., Carbone, S., A. Monteiro dos Santos, D., Dominutti, P., de Oliveira Alves, N., V. Rizzo, L., & Artaxo, P. (2018). Disentangling vehicular emission impact on urban air pollution using ethanol as a tracer. *Scientific Reports, 8*(1), 10679. doi:10.1038/s41598-018-29138-7
- Brown, A., & Harris, W. (2018). *A Vehicle Design and Optimization Model for On-Demand Aviation*. Paper presented at the 2018 AIAA/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference.
- Câmara Municipal de São Paulo. (2018). Agora é Lei: Ônibus terão novas metas para reduzir a emissão de poluentes. Retrieved from <http://www.saopaulo.sp.leq.br/blog/agora-e-lei-onibus-terao-novas-metas-para-reduzir-a-emissao-de-poluentes/>
- COMAER. Ministério da Defesa, Comando da Aeronáutica. ICA 100-12, REGRAS DO AR, (2016).
- Cortez, L. A. B. (2018). *Proálcool 40 anos: Universidades e empresas: 40 anos de ciência e tecnologia para o etanol brasileiro*: Editora Blucher.

- Dajani, J. S., Stortstrom, R. G., & Warner, D. (1977). The Potential for Helicopter Passenger Service in Major Urban Areas.[cost analysis].
- Dajani, J. S., Warner, D., Epstein, D., & Obrien, J. (1976). The role of the helicopter in transportation.[technology assessment for use in civil aviation].
- de Almeida, F. F. M. (1974). *Fundamentos geológicos do relevo paulista*: Universidade de São Paulo, Instituto de Geografia.
- de Paula Santos, U., Braga, A. L. F., Giorgi, D. M. A., Pereira, L. A. A., Grupi, C. J., Lin, C. A., . . . Filho, M. T. (2005). Effects of air pollution on blood pressure and heart rate variability: a panel study of vehicular traffic controllers in the city of São Paulo, Brazil. *European Heart Journal*, 26(2), 193-200. doi:10.1093/eurheartj/ehi035
- DECEA. Departamento de Controle do Espaço Aéreo. AIC N23/13, 2013, circulação vfr de aeronaves nas ctr-sp1, ctr-sp2, ctr-sp3, ctr-sp4, ctr-sp5, ctr-sp6 e sob a projeção vertical da tma-são paulo 1, tma-são paulo 2 e tma-são paulo 3, (2013).
- DECEA. Departamento de Controle do Espaço Aéreo. AIC N 33/18 Circulação de aeronaves em voo VFR na terminal São Paulo, (2018).
- EASA. European Aviation Safety Agency. Certification Specifications for Normal-Category Aeroplanes CS-23, Amendment 5, (2017).
- eia. (2018). U.S. Energy Information Administration. Electricity in the United States is produced with diverse energy sources and technologies. Retrieved from https://www.eia.gov/energyexplained/index.php?page=electricity_in_the_united_states
- EMPLASA. (2018). Empresa Paulista de Planejamento Metropolitano S/A. Região Metropolitana de São Paulo. Retrieved from <https://www.emplasa.sp.gov.br/RMSP>
- Epe. (2013). *Avaliação do comportamento dos usuários de veículos flex fuel no consumo de combustíveis no Brasil, Empresa de Pesquisa Energética*. Retrieved from <http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-250/topico-296/EPE-DPG-SDB-001-2013-r0%5B1%5D.pdf>

- Eurocopter. (2009). *AS 350 B3 Techninal Data*. Retrieved from http://global-helicopter-service.com/wp-content/uploads/2018/04/AS350B3-tech_data_2009-1.pdf
- FAA. (2015). Aviation emissions, impacts & mitigation: A primer.
- AC No: 23.2010-1, FAA Accepted Means of Compliance Process for 14 CFR Part 23, (2017).
- FAA. Federal Aviation Administration. PART 91 - GENERAL OPERATING AND FLIGHT RULES, (2018a).
- FAA. Federal Aviation Administration. PART 135 - Operating Requirements: Commuter And On Demand Operations And Rules Governing Persons On Board Such Aircraft, (2018b).
- Fortune. (2018). Say Hello to Cora, the New Flying Taxi From a Secretive Startup Funded by Google's Larry Page. Retrieved from <http://fortune.com/2018/03/13/cora-kitty-hawk-flying-taxi-larry-page/>
- G1. (2011). SP tem frota pioneira de ônibus movidos a álcool. Retrieved from <http://g1.globo.com/sao-paulo/respirar/noticia/2011/05/sp-tem-frota-pioneira-de-onibus-movidos-alcool.html>
- Governo do Estado de São Paulo. Secretaria de Energia e Mineração. A energia elétrica no Estado. Retrieved from <http://www.energia.sp.gov.br/energia-eletrica/energia-eletrica-no-estado/>
- GRU Airport. (2018). Movimentação de passageiros em Guarulhos cresce em 2017 e chega a 37,7 milhões. Retrieved from <https://www.gru.com.br/en/passenger/noticias-detalhe?code=140>
- helis. (2018). Helicopter History Site. Trump Airlines. Retrieved from <https://www.helis.com/database/org/Trump-Helicopters/>
- Holmes, B. J., Parker, R., Stanley, D., McHugh, P., Burns, C. J., Olcott, M. J. J., . . . McKenzie, D. (2017). *NASA Strategic Framework for On-Demand Air Mobility*. Retrieved from
- IBGE. (2017). Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Panorama: São Paulo. Retrieved from <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/sp/sao-paulo/panorama>
- ICA (Cartographer). (2018). Instituto de Cartografia da Aeronáutica. Carta de corredores visuais, rotas especiais de helicópteros na TMA SP-2 e sob sua

- projeção. Retrieved from https://www.aisweb.aer.mil.br/cartas/visuais/reh/REH_SP_ANEXO_3_E_29_03_2018_LAYERS.pdf
- ICAO. (2015). Helicopter Noise Reduction Technology, Status Report. Retrieved from
- ICAO. (2016). *Onboard a sustainable future, 2016 Environmental report*. Retrieved from <https://www.icao.int/environmental-protection/pages/env2016.aspx>
- ICAO. (2018). Contaminants from Aircraft Engine Emissions. Retrieved from <https://www.icao.int/environmental-protection/Pages/Contaminants.aspx>
- INMET. (2018). Instituto Nacional de Meteorologia. Gráficos Climatológicos (1931-1960 e 1961-1990). Retrieved from <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/graficosClimaticos>
- INRIX. (2018). INRIX Global Traffic Scorecard. Retrieved from <http://inrix.com/scorecard/>
- Janssen, R., Rutz, D., Hofer, A., Moreira, J., Santos, S., Coelho, S., . . . Ericson, J. (2010). *Bioethanol as sustainable bus transport fuel in Brazil and Europe*. Paper presented at the EUROPEAN BIOMASS CONFERENCE AND EXHIBITION.
- Kottek, M., Grieser, J., Beck, C., Rudolf, B., & Rubel, F. (2006). World map of the Köppen-Geiger climate classification updated. *Meteorologische Zeitschrift*, 15(3), 259-263.
- Kovacs, J. (2003, September/2003). Uma breve história das atividades do prof. focke no brasil, A brief history of the activities of prof. Focke in Brazil. *ABCM Engenharia, Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas*, 9, 18-23.
- Lencioni, S. (2014). Helicópteros em São Paulo. O controle do espaço aéreo e a insubordinação dos helipontos. *Scripta Nova. Revista Electrónica de Geografía y Ciencias Sociales*, 18.
- Metrô CPTM. (2016). Quando o Metrô de São Paulo chegará aos 100 km de extensão? Retrieved from <https://www.metrocptm.com.br/quando-o-metro-de-sao-paulo-chegara-aos-100-km-de-extensao/>

- MTA. (2016). *Comprehensive Annual Financial Report, Metropolitan Transportation Authority, MTA, State of New York*. Retrieved from <http://web.mta.info/mta/investor/pdf/2016/2016-CAFR.pdf>
- New York Post. (2018). City re-introduces controversial bill banning helicopter tours. Retrieved from <https://nypost.com/2018/04/16/city-re-introduces-controversial-bill-banning-helicopter-tours/>
- Peisen, D. J., & Lobosco, R. (1991). *New York Downtown Manhattan (Wall Street) Heliport-Operations Analysis*. Retrieved from
- Pilotopolicial. (2017). Grupamento de Radiopatrulha Aérea da PM completou 33 anos e mais de 130 mil horas voadas. Retrieved from <https://www.pilotopolicial.com.br/grupamento-de-radiopatrulha-aerea-da-pm-completou-33-anos-e-mais-de-130-mil-horas-voadas/>
- Prefeitura de São Paulo. (2010). População Recenseada, Taxas de Crescimento Populacional e Densidade Demográfica, Município de São Paulo, Subprefeituras e Distritos Municipais, 1980, 1991, 2000 e 2010. http://infocidade.prefeitura.sp.gov.br/htmls/7_populacao_recenseadadataxa_de_crescimento_1980_10745.html
- Prefeitura de São Paulo. (2017). DECRETO Nº 57.889 DE 21 DE SETEMBRO DE 2017.
- Robinson Helicopter Company. (2018). R44 Raven II & Clipper II. Retrieved from <https://robinsonheli.com/r44-specifications/>
- Rothhaar, P. M., Murphy, P. C., Bacon, B. J., Gregory, I. M., Grauer, J. A., Busan, R. C., & Croom, M. A. (2014). *NASA Langley Distributed Propulsion VTOL TiltWing Aircraft Testing, Modeling, Simulation, Control, and Flight Test Development*. Paper presented at the 14th AIAA aviation technology, integration, and operations conference.
- RottaAtiva. (2014). Helicontrol – Como é feito o controle da maior frota de helicópteros do mundo? Retrieved from <http://www.rottaativa.com/helicontrol-como-e-feito-o-controle-da-maior-frota-de-helicopteros-do-mundo/>
- Sausser, B., Verma, D., Ramirez-Marquez, J., & Gove, R. (2006). *From TRL to SRL: The concept of systems readiness levels*. Paper presented at the Conference on Systems Engineering Research, Los Angeles, CA.

- Silva Castilho, D., & Andrade, D. d. (2012). Is the tiltrotor worthy for civilian transportation between great cities? A case study involving Brazilian important cities.
- Stopthechopnynj.org. (2018). Stop the chop NY NJ, beating blades into plowshares and rotors into pruning hooks. Retrieved from <http://www.stopthechopnynj.org/>
- Storino, P. J. (2014). Leads Continued Use In Avgas.
- TEC-SHS, E. (2008). *TECHNOLOGY READINESS LEVELS HANDBOOK FOR SPACE APPLICATIONS*. Retrieved from
- The Verge. (2018). Uber's 'flying taxis' will be built by these five aerospace companies. Retrieved from <https://www.theverge.com/2018/5/8/17331490/uber-flying-taxi-embraer-pipistrel-karem>
- The Vertical Flight Society. (2018a). EHang 184 Autonomous Aerial Vehicle. Retrieved from <http://evtol.news/aircraft/ehang/>
- The Vertical Flight Society. (2018b). Electric VTOL News. Retrieved from <http://evtol.news/>
- The Vertical Flight Society. (2018c). Embraer DreamMaker. Retrieved from <http://evtol.news/aircraft/embraer/>
- The Vertical Flight Society. (2018d). Uber announces countries shortlisted to have first international Uber Air City. Retrieved from <http://evtol.news/2018/08/30/uber-elevate-announces-countries-shortlisted-to-have-first-uber-air-city/>
- The Vertical Flight Society. (2018e). Volocopter VC200. Retrieved from <http://evtol.news/aircraft/volocopter/>
- Tyan, M., Van Nguyen, N., Kim, S., & Lee, J.-W. (2017). Comprehensive preliminary sizing/resizing method for a fixed wing-VTOL electric UAV. *Aerospace Science and Technology*, 71, 30-41.
- U.S. Department of Energy. (2018). www.fueleconomy.gov. Retrieved from <https://www.fueleconomy.gov/feg/Find.do?action=sbs&id=38680>
- Uber. (2016). *Fast-Forwarding to a Future of On-Demand Urban Air Transportation*. Retrieved from <https://www.uber.com/elevate.pdf>

- Uber. (2018a). *eVTOL Vehicle Requirements and Missions*. Retrieved from <https://s3.amazonaws.com/uber-static/elevate/Summary+Mission+and+Requirements.pdf>
- Uber. (2018b). Uber Air's International Launch Market. Retrieved from <https://www.uber.com/info/elevate/cities/>
- Ullman, D. G., Homer, V., & Horgan, P. (2017). Comparing Electric Sky Taxi Visions.
- Vádebike.org. (2018). São Paulo terá 80 mil bikes compartilhadas, muitas delas sem estação. Retrieved from <http://vadebike.org/2018/04/bicicletas-compartilhadas-dockless-sao-paulo-serttel-trunfo-mobike-yellow/>
- Viracopos Aeroportos Brasil. (2018). *Movimento Operacional do Aeroporto de Viracopos: Janeiro a Dezembro de 2017*. Retrieved from <http://www.viracopos.com/lumis/portal/file/fileDownload.jsp?fileId=2C9E81B260E357E501619FADD4877BB7>
- Voom. (2018). Voom - An Airbus Company. Retrieved from <https://www.voom.flights/>
- Walsh, J. L., Bingham, G. J., & Riley, M. F. (1987). Optimization methods applied to the aerodynamic design of helicopter rotor blades. *Journal of the American Helicopter Society*, 32(4), 39-44.
- Watkinson, J. (2004). *Art of the Helicopter*. Oxford: Elsevier Butterworth-Heinemann.
- World Bank. (2017). Country profile, Argentina. http://databank.worldbank.org/data/views/reports/reportwidget.aspx?Report_Name=CountryProfile&Id=b450fd57&tbar=y&dd=y&inf=n&zm=n&country=ARG
- World Bank. (2018). Brazil.
- ZDNet. (2018). Brazil shortlisted for Uber Air launch. Retrieved from <https://www.zdnet.com/article/brazil-shortlisted-for-uber-air-launch/>

ANNEXE 1 – Article présentée à l'International Symposium on Sustainable Aviation 2018 – Université Sapienza di Roma (Juillet/2018).

THE CONTRIBUTION OF EVTOL TO SUSTAINABLE URBAN AIR TRANSPORTATION

Vieira, Darli R.; Silva, Dreyfus
University of Quebec at Trois-Rivières, C.P. 500
Research Chair in Management of Aeronautical Projects
darli.vieira@uqtr.ca; dreyfus.silva@uqtr.ca

SUMMARY

This article will discuss the contribution of eVTOL (electric Vertical Take-off and Landing) aircraft technology to the sustainable air transport in the urban environment. The eVTOL is a disruptive technology, which will become reality in the near future, bringing several advantages over conventional helicopters. The discussion will comprise a comparison of the major designs currently under development, their advantages and handicaps, and the challenge of civil certification.

Keywords: aviation, electric propulsion, eVTOL, urban air mobility, sustainable, green operation

1. INTRODUCTION

Shortly after the invention of the first heavier-than-air flying machines in the beginning of the 20th century, aviation pioneers started to pursue developing aircraft capable of vertical take-off and landing (VTOL), avoiding the need for runways. A huge technical evolution was made from the first practical helicopter, the Focke-Wulf Fw 61 (1938) (Watkinson, 2004), up to modern VTOL aircraft, like the Bell Boeing V-22 Osprey or AS350 helicopter, but the main design concepts were kept the same.

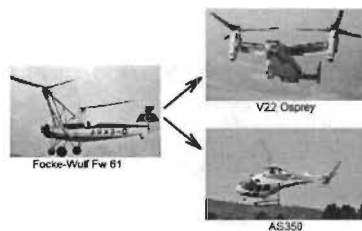


Figure 1. From the FW61 to the modern VTOL

Now, in the beginning of the 21st century, a technological revolution promises to insert VTOL aircraft in the life of regular people in the next 5 to 10 years (Uber, 2016). The responsible for this revolution is the eVTOL (electric VTOL) technology.

In October 2016, Uber issued a white paper named *Fast-Forwarding to a Future of On-Demand Urban Air Transportation* (Uber, 2016) which attracted attention from the whole aeronautical industry, describing its vision for the use of eVTOL vehicles for air transportation in the urban environment. Several organizations rushed to develop their eVTOL concepts to cope with Uber's vision. The proposed designs vary a lot, but all of them are aimed to fulfill the so called UAM (urban air mobility) market, which comprises the transportation of passengers or small cargo, by the air, within the urban environment, or short commuter routes. This role is played nowadays by helicopters. But, despite their flexibility, helicopters have some handicaps that are vastly surpassed by eVTOL vehicles, when considering sustainable operation.

The use of eVTOL will push UAM towards an environmentally friendly operation, while providing higher levels of safety to users. But, the eVTOL technology has still to face huge challenges before coming to the market. It is possible to list a considerably big number of these challenges, but the lack of specific regulations for civil Certification seems to be the toughest to overcome, and was chosen to be addressed in this paper. The discussion will comprise the comparison of the major designs currently under development, their advantages and handicaps, and the challenge of obtaining civil Certification.

As there are no current commercial deployments of this technology, the research was conducted based on literature and public access information of the projects under development.

2. THE EVTOL SOLUTION TO UAM

2.1. The helicopter and UAM

The helicopter (a type of VTOL aircraft) plays an important role in the urban air mobility of some of the world's largest metropolises (Cwerner, 2006), with unmatched flexibility. Helicopters are used for rescues, police enforcement, air ambulance, among other important services.

As helicopter flights started to popularize and take place within the urban environment, they quickly became a concern for these populations, especially when considering noise and air pollution. So, alternative solutions must be developed to contribute with the overall sustainability of urban air mobility.

2.2. The Convertiplane VTOL

The helicopter, which relies on rotary wings to provide 100% of its lift (and thrust) pays huge penalties during forward flight, when rotors are far less efficient than wings in the generation of lift (Walsh, Bingham, & Riley, 1987). In the late 1940's, a new design appeared, aiming to mix the helicopter capabilities of vertical flight, with the better cruise efficiency of airplanes. This design was called the Convertiplane, a machine which

takes-off and lands vertically, using the lift generated by rotors, but tilts these rotors to produce forward thrust in cruise flight, relying on wings to generate lift (with much more efficiency).

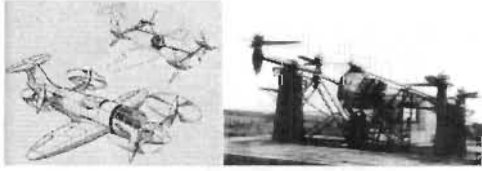


Figure 2. Heliconair HC-1, example of convertiplane

These convertiplane designs were mechanically far more complex than the conventional helicopters. And this is the reason why, despite convertiplane designs have been around for a while (especially for military applications), most of those programs have failed to enter on series production. The complexity of controlling the aircraft in the air, the high number of mechanical rotating parts (including complex transmission system) and the resulting high-weight/low-payload characteristics, are the main reasons why most past convertiplane designs never entered into service. But, at the last decades of the 20th century, new technologies made the Convertiplane VTOL a more practical solution. These technologies were fly-by-wire flight controls and composite materials. Complex mechanical transmission systems were still necessary, until the recent developments made on electric propulsion, giving birth to the concept of the eVTOL.

2.3. The eVTOL

The eVTOL is a category of VTOL aircraft that uses electric motors instead of ICE (Internal Combustion Engine), eliminating the need for complex mechanical transmission systems. There are several advantages when using electric propulsion on the VTOL. Some of the most important advantages are addressed below.

2.3.1. Distributed electric propulsion

Electric motors allow for DEP (Distributed Electric Propulsion) installations. DEP is the use of multiple rotors, each one directly driven by an electric motor, instead of just one main rotor (like in most helicopters) (Borer et al., 2016). DEP installations present graceful degradation, which means that single failures will degrade aircraft thrust and controllability only incrementally.



Figure 3. DEP on NASA GL10 Greased Lightning

DEP is possible due to the fact that electric motors are very efficient in a wide range of sizes, differently of ICE's (Brown & Harris, 2018). So, it is possible to use multiple small electric motors, instead of a single (or few) ICE that relies on a transmission system to distribute torque to rotors.

The use of electric propulsion also presents the following advantages over ICE (Uber, 2016): higher power-to-weight ratio, possibility to use momentary emergency power in excess of 150% of MCP (maximum continuous power) in case of inoperative motors, lower number of moving parts (within the motor, and no need for transmission), better integration with fly-by-wire, lower noise generation, lower maintenance costs, zero operational emission of gases and a much better overall energy efficiency figure of around 10 times.

2.3.2. Environmental contribution of eVTOL

The operation of helicopters in urban areas brings clear environmental impacts, like noise and air pollution.

2.3.2.1. Noise pollution

Helicopters are perceived by the general population as a very annoying noise source (Amoroso, Castelluccio, & Maritano, 2012). Current helicopter designs present three main sources of noise (ICAO, 2015): the main rotor, the tail rotor (anti-torque) and the engine(s). For each type of helicopter, and each flight phase, one (or more) of these components plays a major role in the overall helicopter noise. For a classic design helicopter, two phenomena are also big contributors to helicopter noise (ICAO, 2015):

- HSI (High Speed Impulsive noise): cruising in high speeds, the helicopter forward speed adds to the advancing blade tip tangential speed, approaching transonic region, and generating shock waves;
- BVI (Blade Vortex Interaction): happens when blade tip vortex recirculates into main rotor and intercepts subsequent blades, creating the characteristic sound of "blade slapping";

The eVTOL practically eliminates these noise-generating characteristics present in helicopters, due to:

- Use of DEP, with multiple small radius rotors instead of only one (or few) big rotors, practically eliminates HSI and BVI;
- There is no need for anti-torque tail rotors;
- No noisy reciprocating or turbine ICE's;

2.3.2.2. Air pollution

The air pollution generated by Helicopter engines receives lower importance in the discussions on environmental impact of aviation, when compared to noise. But, these emissions cannot be neglected, due to the proximity to the communities where they happen and the toxicity levels of the emitted substances.

In addition to emitting greenhouse effect gases (like CO₂), helicopter turbines operation also generates a series of contaminating compounds, like: NO/NO₂, CO, unburned hydrocarbons, SO_x, non-volatile particulate matter (nvPM), among others (ICAO, 2018). Also, reciprocating engines, like the ones used on the very popular Robinson R-

44 helicopters, use Avgas (100LL) as fuel, which contains TEL (tetraethyl lead) additive, highly poisonous to humans (Storino, 2014).

Due to the use of electric motors, eVTOL aircraft will present zero operational emission of polluting gases.

2.4. Main designs currently under development

2.4.1. Design complexity

The design complexities of the eVTOL aircraft under development can vary significantly depending on the chosen technical solutions. The Figure 7 shows a qualitative comparison of complexity levels of current eVTOL design choices.

Among all the different designs under development, the wingless multicopters present the lowest complexity due to the absence of tilting components (rotors or wings). This characteristic possibly explains the fact that some of the first eVTOL aircraft to perform manned flights were multicopters, like the Ehang 184 (see Figure 4), which is essentially a scaled-up multicopter drone, that has performed several manned flights since 2015 (Vertical Flight Society, 2018), and the Volocopter VC200, which performed its first manned flight in 2016 (Vertical Flight Society, 2018).

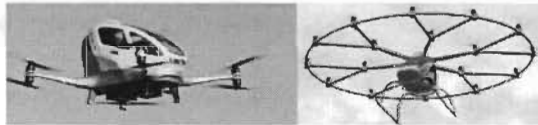


Figure 4. Ehang 184 and Volocopter VC200

An intermediary design, in terms of complexity, between the multicopter and the convertiplane is the Hybrid Lift+Cruise. These aircraft present a dedicated set of rotors used during vertical flight, like multicopters, and one (or more) horizontal rotor(s) dedicated to forward flight. No tilting components are used. During the cruise flight, the vertical rotors are stopped and 100% of the lift is obtained from fixed wings. The Kitty-Hawk Cora is an example of this kind of design (see Figure 5).



Figure 5. The Kitty-Hawk Cora Hybrid Lift+Cruise

Design complexity of eVTOL increase when tilting components are added. The *tilt rotors*, *tilt rotors+wing*, and *thrust vector* (examples in Figure 6) are the most complex to develop, due to the need of tilting the lift-generating components while transferring lift from rotors to the wings, during transition phase from hover to forward flight. These designs will possibly have the longest time to develop and fly prototypes.



Figure 6. Tilt rotor, tilt wing+rotor and thrust vector

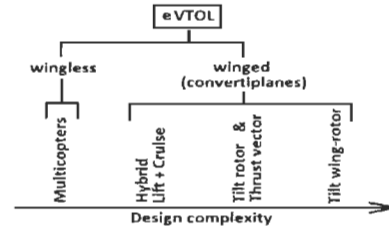


Figure 7. Main types of eVTOL designs under development and a qualitative complexity comparison

2.4.2. Performance and noise

Disc loading (weight of the aircraft divided by the total area of the rotors) is a key design parameter for any VTOL aircraft, as it affects its performance and noise related characteristics. In general, the lower the disc loading, the better the hover performance (less power necessary to maintain hover) (Uber, 2016). Conventional helicopters are examples of very low disc loading VTOL. Also, lower disc loading results in quieter hover characteristics (Brown & Harris, 2018).

Multicopters present some of the lowest disc loading values among eVTOL, resulting in better hover performance and lower hover noise levels. The low disc loading of the multicopters is generally achieved by using a large number of rotors. But, multicopters are not optimized for forward flight, presenting very low L/D (lift-to-drag) ratios, due to the absence of wings. So, multicopters are more suitable for short-range/low-speed applications.

The presence of wings significantly increases cruise performance of convertiplane eVTOL in relation to multicopters. The choice between tilting or non-tilting wings may play an important role in the hover-performance of these vehicles. A non-tilting wing is submitted to downwash from the rotors, reducing hover performance. This is why Tilt wing+rotor design presents better hover performance in relation to both Tilt Rotor and Hybrid Lift+Cruise designs. Lift+Cruise designs also pay a huge penalty in cruise flight, by carrying unused vertical motors and stopped rotors (drag).

Convertpplane designs can be equally employed in within-city-limits air service or inter-urban mid-range routes. But, the benefits that come from the use of wings and possibility to reach higher speeds, may not be perceived on very short trips.

On the other extreme, presenting very high disc loading, mixed with the use of wings, is the thrust vector design. The Lilium Jet (see Figure 6) is an example of this design. The small radius ducted fans used on the Lilium are tiltable between hover (vertical thrust) and cruise (horizontal thrust)

positions. In cruise position, this configuration tends to favor longer distances/higher speed applications. But, the higher disc loading may lead to higher noise levels in hover, which may become a concern for this kind of propulsion.

2.5. Type certification of eVTOL aircraft

No aircraft can operate commercially without a TC (type certificate) from a certification authority. FAA (Federal Aviation Administration) and EASA (European Aviation Safety Agency) are the main authorities under which most of the TC's of the world are issued. Also, both entities cooperate closely to keep a high-level of harmonization between their regulations. Certification efforts of future eVTOL vehicles, must be made in cooperation with at least one of these two entities.

Differently from military certification (focused on mission requirements), civil certification is focused on demonstrating that the design complies with regulations that aim at guaranteeing the highest level of safety. So, it is expected that a new kind of aircraft, like the eVTOL, will be submitted to a considerable scrutiny before receiving a TC.

The discussions on the certification basis of these aircraft have already started, but due to the multiple types of designs, the definition of a single certification basis is a huge challenge for applicants and authorities. The certification basis for eVTOL aircraft is still not defined, and must be agreed between the manufacturer and the authority, based on the specificities of each design.

To illustrate the difficulties on meeting specific certification requirements, let's pick the autorotation condition for helicopters, for example. Due to the rotors characteristics of most eVTOL multicopters (small radius, low mass), these vehicles will probably not be capable of autorotation, which is a condition under which helicopters must demonstrate to be controllable (FAA/EASA part 27 or 29, paragraph 27.143(a)(2)(v)).

Most eVTOL designs under development, present maximum take-off weight and passenger number that fit into part 23 (small airplane) or part 27 (normal category rotorcraft) certification. So, it is probable that a mix of part 23 and 27 regulations will be used for the certification of these eVTOL as **special classes of aircraft**. The certification process of eVTOL may be addressed by 14 CFR part 21.17(b) (special classes of aircraft), which defines that for those aircraft "*which airworthiness standards have not been issued...*" the applicable requirements will be "*...portions of those other airworthiness requirements contained in Parts 23, 25, 27, 29, 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*".

The FAA 14 CFR Part 23 regulations passed recently (August 30, 2017) through a reformulation

(amendment 64), which introduced the concept of Consensus Standards for the demonstration of means of compliance. According to AC23.2010-1 (FAA, 2017), Consensus Standards are "*...Industry developed standards the Administrator has accepted for use as a means of compliance to the part 23 regulations...*". This means that recognized non-governmental institutions like ASTM International and RTCA (Radio Technical Commission for Aeronautics), for example, can work together with manufacturers to propose alternative means to demonstrate compliance with part 23 requirements. EASA has harmonized with amendment 64 of part 23 and issued a revision of the CS-23 (amendment 5), effective since 1st April 2017.

3. CONCLUSIONS

In the last decade, the advances in electric propulsion made possible the concept of the eVTOL. These new types of air vehicles will rely on DEP to achieve lighter, less complex, safer and more environmentally friendly VTOL aircraft. eVTOL have many advantages over helicopters, like zero operating emissions of polluting gases and lower noise levels, making them more suitable for the use in the urban environment.

Several companies (and even government agencies) are rushing in this moment to develop eVTOL aircraft. This rush was triggered by UBER's Elevate initiative (Uber, 2016).

eVTOL vehicles under development in the moment vary a lot in their design choices. These choices may affect significantly their complexity, performance and certification. Multicopters are the simplest kind of design to be constructed and prototyped, have the best hover performance, but pay huge penalties in forward flight. Convertiplanes present more complexity in their design, due to tilting components, but present the best performance in forward flight, due to the use of wings to generate 100% of lift.

The main challenge for the entry-into-service of these aircraft is the certification process. As there are no civil certification requirements for eVTOL aircraft, it is necessary that each manufacturer agrees with certification agencies (like FAA or EASA) the requirements to be fulfilled. A considerable effort is being made in this moment, among industry and authorities, to reach for a common basis to certify these aircraft for civilian use. The 14 CFR part 21.17(b) (*Special Class of Aircraft*), together with Amendment 64 of FAR 23 or Amendment 5 of CS23 may be used as the point of start for the certification basis of some of these vehicles. So, it is probable that eVTOL designs that apply for certification with a part 23 approach (for winged designs), requesting classification under special class (21.17(b)), are more likely to reach certification earlier than a part 27 approach (like the case for the multicopters).

4. REFERENCES

Amoroso, S., Castelluccio, F., & Maritano, L. (2012). Helicopter operations: the environmental impact and ground facilities. Procedures and operational standards for the system's acceptance. Paper presented at the 4th International Conference HELI World 2012: Helicopter Technologies and Operations.

Borer, N. K., Patterson, M. D., Viken, J. K., Moore, M. D., Bevirt, J., Stoll, A. M., & Gibson, A. R. (2016). Design and performance of the NASA SCEPTOR distributed electric propulsion flight demonstrator. Paper presented at the 16th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations Conference.

Brown, A., & Harris, W. (2018). A Vehicle Design and Optimization Model for On-Demand Aviation. Paper presented at the 2018 AIAA/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference.

Cwerner, S. B. (2006). Vertical flight and urban mobilities: The promise and reality of helicopter travel. *Mobilities*, 1(2), 191-215.

ICAO. (2015). Helicopter Noise Reduction Technology, Status Report. Retrieved from

Storino, P. J. (2014). Leads Continued Use In Avgas.

Uber. (2016). Fast-Forwarding to a Future of On-Demand Urban Air Transportation. San Francisco, CA.

Walsh, J. L., Bingham, G. J., & Riley, M. F. (1987). Optimization methods applied to the aerodynamic design of helicopter rotor blades. *Journal of the American Helicopter Society*, 32(4), 39-44.

Watkinson, J. (2004). *Art of the Helicopter*. Oxford: Elsevier Butterworth-Heinemann.

AHS (American Helicopter Society), <http://evtol.news/>, accessed on April 2018, (source of images for eVTOL aircraft presented in this paper)

Voom, 2018, <https://www.voom.flights/>, accessed on April 2018

ICAO, 2018, <https://www.icao.int/environmental-protection/Pages/Contaminants.aspx>, accessed on February 2018

Fortune, 2018, <http://fortune.com/2018/03/13/cora-kitty-hawk-flying-taxi-larry-page/>, accessed on April 2018

Vertical Flight Society, 2018, <http://evtol.news/aircraft/ehang/>, accessed on April 2018

Vertical Flight Society, 2018, <http://evtol.news/aircraft/volocopter/>, accessed on April 2018

<https://oldmachinepress.com/2017/03/20/cta-ita-heliconair-hc-i-convertoplano/>, accessed on April 2018

ANNEXE 2 – Article soumis au IJSA (International Journal of Sustainable Aviation), Septembre/2018.

Electric VTOL Aircraft: The future of Urban Air Mobility (BACKGROUND, Advantages and Challenges)

Abstract: This article will discuss eVTOL (electric Vertical Take-off and Landing) aircraft technology. eVTOL is a groundbreaking technology that has become the buzzword in urban air mobility solutions and promises to become reality in the near future, offering several advantages over conventional helicopters. As of the writing of this paper, several aeronautical companies are competing to bring the first eVTOL aircraft into commercial operation. However, there are huge challenges to overcome, ranging from battery technology to certification regulations. This paper will discuss the major designs currently under development, their advantages and handicaps, and the challenge of civil certification.

Keywords: aviation, electric propulsion, eVTOL, urban air mobility, air taxi, sustainable; certification; te

1 Introduction

1.1 Context

Shortly after the invention of the first heavier-than-air flying machines at the beginning of the 20th century, aviation pioneers began to pursue the development of aircraft capable of vertical takeoff and landing (VTOL), thus avoiding the need for runways. The invention of the first auto-gyro, Cierva C.1, by Juan de La Cierva in 1920, for the first time connecting the wings to a turning rotor, gave a practical impulse to the development of the helicopter (the first heavier-than-air flying machine capable of taking off and landing vertically). However, due to the technical difficulties that had to be overcome, the initial development of the helicopter was relatively slow (Watkinson, 2004) compared to the development of airplanes. Although huge technical advancements were made between the first practical helicopter, the Focke-Wulf Fw 61 (1938), designed by Heinrich Focke (Watkinson, 2004), and modern VTOL aircraft, such as the Bell Boeing V-22 Osprey or AS350 helicopters, the main design concepts were kept almost the same (see Figure 1).

Now, at the beginning of the 21st century, a new technological revolution is occurring, which promises to insert VTOL aircraft into the lives of regular people in the next 5 to 10 years (Uber, 2016). The main responsibility for this revolution lies in eVTOL (electric VTOL) technology, which has evolved from a science-fiction dream into a reality that may materialize in the near future.

In October 2016, Uber issued a white paper titled *Fast-Forwarding to a Future of On-Demand Urban Air Transportation* (Uber, 2016), which quickly attracted the attention of the whole aeronautical industry. The paper described a vision for the use of eVTOL vehicles in on-demand urban air transportation. Since then, several organizations have rushed to develop their eVTOL concepts in response to Uber's vision for this

Author

market. These organizations include large consolidated players in the aerospace industry, such as Airbus Group, Embraer, Boeing and Bell Helicopters; government agencies such as NASA; and promising startups such as Lilium Aviation, Volocopter, Joby Aviation and Ehang.

The proposed designs vary greatly, but the clear majority of them are aimed at serving the so-called UAM (urban air mobility) market, which focuses on the transportation of passengers or small cargo by air within the urban environment, or on short commuter routes. This role is currently played by helicopters, operating under part 135 (*commuter and on demand, air taxi*) or part 91 (*general aviation*) regulations (FAA, 2018). However, despite their flexibility in fulfilling many types of missions, helicopters have some handicaps that are vastly surpassed by eVTOL vehicles, particularly when sustainable operation is considered.

The use of eVTOL in urban air transport will push this market towards environmentally friendly (green) operation while providing higher levels of safety to users. The implementation of solutions such as DEP (distributed electrical propulsion), augmented piloting digital flight controls and autonomous flight will revolutionize UAM (Uber, 2016).

However, eVTOL technology still faces huge challenges before it can come to the market. A large number of these challenges can be listed, but the lack of specific regulations for civil certification is (in the opinion of the authors) the toughest to overcome and will be the main focus of this paper. To complement the discussion, the main types of proposed designs and their advantages/handicaps will also be examined.

This paper is situated at the intersection of the issues that arise from the necessary overlap of VTOL aviation, electric propulsion and aeronautical certification (c.f. Figure 2)

In sum, the main objectives of this research are as follows: 1) Investigate the technical solutions currently under development for eVTOL designs; 2) Survey how eVTOL technology can address the challenge of obtaining Type Certification; and 3) Elaborate on the main designs under development targeting the sustainable deployment of eVTOL technology in UAM services.

The discussion will compare the major designs currently under development, their advantages and handicaps, and the challenge of obtaining civil certification.

Because there are no current commercial deployments of this technology, the research will be conducted based on literature and public access information about the projects under development.

2. Literature review

2.1 *The helicopter as air taxi*

The helicopter (a type of VTOL aircraft) offers unmatched flexibility and plays an important role in the urban mobility environment of some of the world's largest metropolises (Cwerner, 2006). In addition to being used as air taxis, helicopters are also

Title

used for rescues, police enforcement, and air ambulance purposes, among other important services.

The city of São Paulo/Brazil (the largest helicopter fleet in world), for example, has approximately 2,000 (ABRAPHE, 2013) helicopter takeoff and landing operations per day (including part 91 and 135 operations). With the strong demand in this market, large companies began to offer on-demand air taxi services similar to those already offered for ground taxis (such as Uber or Cabify), betting on the popularization of this type of service. Voom (by *Airbus Helicopters*) and UberCopter (by *Uber*) are two examples of companies created to explore this segment of transportation (Voom, 2018). Currently, it is possible to use an on-demand helicopter air taxi in São Paulo for as little as US\$ 63.00 per trip (Bloomberg, 2016)

Compared to commercial aviation flights (part 121) (FAA, 2018), which rely on airfields to operate, helicopter air taxi service numbers are small. However, as these flights become more popular and begin to take place within the urban environment of big cities (or the inter-urban environment), flying at low altitudes, operating from helipads installed on top of buildings (or close to them), the increase in helicopter operations will become a relevant aspect of the lives of the populations of these cities, especially considering the noise and air pollution that will be generated. Therefore, alternative solutions must be studied, developed and deployed to contribute to the overall sustainability of air mobility in the urban environment.

2.2 *The Convertiplane VTOL*

Helicopters are the most widespread VTOL design (Watkinson, 2004). However, there are other designs that offer advantages over helicopters for some types of missions, as is the case when considering urban air mobility.

The helicopter concept, which relies on rotary wings to provide 100% of the aircraft's lift (and thrust), pays huge penalties during the cruise phase of the flight. The rotary wings are far less efficient than fixed wings in the generation of lift in forward flight, as they are optimized for hovering (Walsh et al., 1987). In the late 1940s, new designs began to appear that aimed to mix the helicopter's capabilities to hover, takeoff and land vertically with the better cruise efficiency of fixed-wing aircraft. This type of design was called the Convertiplane. The Brazilian Heliconair HC-1 convertiplane (see Figure 3), designed by German engineer Heinrich Focke (1952) (Old Machine Press, 2017), is one of the first examples of these attempts. The concept of the convertiplane is to take off and land vertically, using the lift generated by rotors, and then tilt these rotors to produce forward thrust in cruise flight, relying on the fixed wings to generate 100% of the lift (with much more efficiency).

However, these convertiplane designs were mechanically far more complex than the conventional helicopter. This is the reason why, although convertiplane aircraft development programs have existed for a while (especially for military applications), most designs have failed to enter series production. The complexity of controlling the aircraft in the transition between hover and forward flight, the high number of mechanical rotating parts (including complex transmission systems) and the resulting high-weight/low-payload characteristics are the main reasons why most past convertiplane designs never entered into service (Rothhaar et al., 2014).

Author

In the last decades of the 20th century, new technologies entered the scene and made the Convertiplane VTOL a viable solution. These technologies are the use of fly-by-wire electronic digital control (for aircraft stabilization) and the practical use of composite materials (reducing weight, resulting in higher payload capacity). However, the use of complex mechanical transmission systems was still unavoidable due to the use of ICEs (Internal Combustion Engines). Now, the recent developments made in electric propulsion have given birth to the concept of eVTOL (Rothhaar et al., 2014).

2.3 eVTOL

Electric vertical takeoff and landing (eVTOL) is a category of VTOL aircraft that uses electric motors instead of fossil (or bio) fuel ICEs (reciprocating or turbine). The use of electrical propulsion allows VTOL designs to eliminate the need for complex mechanical transmission systems. Using electric propulsion offers several advantages to the VTOL concept. Some of the most important advantages will be addressed in this section.

2.3.1 The electric motor and DEP

Electric motors allow for DEP (Distributed Electric Propulsion) installations. DEP is the use of multiple rotors, each one directly driven by an electric motor, instead of just one main rotor (as in most helicopters) (Borer et al., 2016). DEP-equipped aircraft will present graceful degradation characteristics, which means that single engine failures will only degrade aircraft thrust and controllability incrementally. For example, if one of the 10 electrical motors of the NASA GL10 concept (see Figure 4) fails completely, the aircraft's overall hover thrust capability will be affected by approximately 10%, allowing the possibility to continue the mission or abort with minor consequences. The controllability of the aircraft remains the same for the pilot (due to fly-by-wire compensation), and the cruising capacity will be minimally affected.

DEP is possible because electric motors are very efficient in a wide range of sizes, unlike ICEs (Brown and Harris, 2018), so it is possible to use multiple small electric motors instead of a single (or few) ICEs that rely on a transmission system to distribute mechanical power to rotors.

The use of electric propulsion also presents the following advantages over ICEs (Uber, 2016): higher power-to-weight ratio; the possibility to use momentary emergency power in excess of 150% of MCP (maximum continuous power) in case of inoperative motors; low number of moving parts (within the motor, and no need for transmission); better integration with fly-by-wire and autopilot; much lower noise generation; lower maintenance costs; zero operational emission of gases and a much better overall energy efficiency figure (approximately 10 times better than an ICE).

2.3.2 Environmental contributions of eVTOL

The operation of current VTOL aircraft (helicopters) in urban areas brings clear environmental impacts (Amoroso et al., 2012). The most important are noise and air pollution. Helicopter air pollution has a smaller impact than helicopter noise generation but cannot be completely ignored.

Title

2.3.2.1 Noise pollution

The increase in the operation of helicopters within urban environments, especially in big cities, may transform from a simple annoyance into a public health problem when noise pollution is considered. Helicopters are perceived by the general population as a very annoying source of noise (Amoroso et al., 2012).

Current helicopter designs present three main sources of noise (ICAO, 2015): the main rotor, the tail rotor (anti-torque) and the engine(s). For each type of helicopter and each flight phase, one of these three components plays a major role in overall helicopter noise. For a classically designed helicopter with a free tail rotor, some general rules apply (ICAO, 2015):

- Take-off: this is the flight phase when the helicopter uses more power, and consequently the anti-torque rotor is in high demand. During takeoff and the initial climb, the engine(s) and the anti-torque rotor are the most important contributors to helicopter noise.
- Cruise: in cruise flight, the necessary power and anti-torque to maintain straight and level flight are lower in relation to other flight phases. In this phase, the helicopter's forward speed adds to the advancing blade tip's tangential speed (which is high due to the relatively long rotor blades); it approaches the transonic region and generates shock waves. This phenomenon, called HSI (High Speed Impulsive noise), is the greatest contributor to helicopter noise during cruise.
- Landing: this is the flight phase when helicopter noise is louder and lasts longer. During the landing approach, the phenomenon of BVI (Blade Vortex Interaction) creates the characteristic sound of "blade slapping". BVI occurs when the blade tip vortex recirculates into the main rotor and intercepts subsequent blades. The main rotor is the main contributor to helicopter noise during the approach and landing phases.

The eVTOL designs under development eliminate most of the noise-generating characteristics present in helicopters, as explained below:

- Use of DEP, with multiple small radius rotors instead of only one (or few) large rotor, practically eliminates HSI and BVI;
- There is no need for anti-torque tail rotors;
- No noisy reciprocating or turbine ICE's;

According to (Uber, 2016), it is expected that the total noise generated by an eVTOL air taxi aircraft will be as low as that of ground transportation vehicles, like such as a mid-size truck. However, of course, the noise characteristics of those future eVTOL aircraft may vary considerably based on design choices, such as rotor disc-loading (ratio of aircraft weight/total rotor disc area), pure electric or hybrid-electric (batteries+generators) power source, and the type of thrust to be used (ducted, unducted, jet-type, etc...etc.) (Brown and Harris, 2018).

2.3.2.2 Air pollution

The air pollution generated by helicopter engines (reciprocating or turbine) generally receives less attention in discussions on the environmental impact of aviation when compared to helicopter noise. However, these emissions cannot be neglected given the

Author

proximity to the communities where they occur and the toxicity levels of the emitted substances.

Due to the use of electric motors, the eVTOL aircraft will present zero operational emissions of polluting gases (except when hybrid-electric solutions are used). In addition to contributing to the overall environmentally sustainable operation of air-taxi service in the urban environment, this *green appeal* will also strongly contribute to the acceptance of these new types of vehicles by the communities where they will operate.

As an example, for each 1 kg of jet fuel burned, approximately 3.16 kg of CO₂ is emitted to the atmosphere (ICAO, 2018). Then, compared to a regular passenger car (e.g., Hyundai Elantra), an AS350B3 turboshaft helicopter, manufactured by Airbus Helicopters, emits approximately 11 times more CO₂ per km in cruise flight, for almost the same number of passengers (5 in the AS350B3 against 4 in the Elantra) (Eurocopter, 2009 and US. Dept. of Energy).

In addition to emitting greenhouse gases (such as CO₂), the operation of helicopter engines also generates a series of contaminating compounds, such as nitrogen oxides (NO and NO₂), carbon monoxide (CO), unburned hydrocarbons, sulfur oxides, and non-volatile particulate matter (nvPM), among others (ICAO, 2018). The process of burning jet fuel (Jet A1) like that used on turbine helicopters (like the AS350) is a major emitter of fine particulate matter (smaller than 2.5 micrometers), which poses a risk to human health (affecting the lungs, heart and even nervous system) (FAA, 2015).

Reciprocating engines, like the ones used on the very popular Robinson R-44 helicopters, use Avgas (100 LL) as fuel. Avgas contains TEL (tetraethyl lead) as an anti-detonating additive, which is highly poisonous to humans (Storino, 2014). In the United States, Avgas is the last remaining type of fuel allowed to use TEL as the main anti-detonating agent. A huge effort is being made by the FAA (Federal Aviation Administration) to push general aviation to adopt alternative fuels that do not rely on TEL (FAA, 2015). The electric propulsion to be used eVTOL (and also general aviation fixed wing aircraft) is perceived as a very promising solution by the aeronautical community.

2.4 eVTOL designs

This section will present the main designs currently under development and will compare their main characteristics. The several eVTOL programs under development for the purpose of UAM applications vary greatly in their design choice aspects. Currently, these programs are proceeding in parallel, intending to deliver a practical product that will enter into service within five years (Uber, 2016). There are programs in very advanced stages with prototypes that are already flying, such as the Chinese Ehang 184 and the German Volocopter VC200, and other programs that are in the initial phase but have great ambitions, mainly due to the large investments (engineering and money) being made. Examples include the Airbus A3 Vahana and CityAirbus.

2.4.1 Design complexity

The design complexities of the eVTOL aircraft under development can vary significantly depending on the chosen technical solutions. It is natural to expect that those aircraft with the lowest design complexity will become the first to fly prototypes, as simpler designs may lead to much faster development and testing. The same may not necessarily be true

Title

when considering the certification process. Figure 5 presents a qualitative comparison of the complexity levels of current eVTOL design choices.

Among all the different designs under development, the wingless multicopters present the lowest complexity due to the absence of tilting components (rotors or wings) in the transition from hover to forward flight. This characteristic possibly explains the fact that some of the first eVTOL aircraft to perform manned flights were multicopters, such as the Ehang 184 (made by the Chinese drone manufacturer Ehang) (see Figure 6), which is essentially a scaled-up multicopter drone that has performed several manned flights since 2015 (The Vertical Flight Society, 2018). Additionally, the German Volocopter VC200 (see Figure 7) performed its first manned flight in 2016 (Vertical Flight Society, 2018).

An intermediary design, in terms of complexity, between the multicopter and the convertiplane is the Hybrid Lift+Cruise. Like multicopters, these aircraft present a dedicated set of rotors used during vertical flight and one (or more) horizontal rotor(s) dedicated to cruise flight. No tilting components are used. During the cruise flight, the vertical rotors are stopped, and 100% of the lift is obtained from fixed wings. This design is in fact a mix of a multicopter with an airplane. The Kitty-Hawk Cora is an example of this type of design (see Figure 8), and the project is being sponsored by Google's co-founder Larry Page (Fortune, 2018).

The design complexity (and consequently the development effort) of eVTOL increases when tilting components are added, with the objective of achieving better overall performance by adding the characteristics of the convertiplanes.

The *tilt rotors* (example in Figure 9), *tilt rotors+wing* (example in Figure 10) and *thrust vector* (example in Figure 11) designs are the most complex to develop due to the need to tilt the lift-generating components while transferring lift from rotors to the wings during the transition phase from hover to forward flight. Of all the designs, it will probably take the longest to develop and fly prototypes of this one.

2.4.2 Performance and noise

Disc loading is a very important design parameter for any VTOL aircraft because it affects most of the aircraft's performance and noise-related characteristics. As a general rule, the lower the disc loading, the better the hover performance (meaning less power is necessary to maintain hover flight) (Uber, 2016). Conventional helicopters are examples of very low disc-loading VTOL. Additionally, lower disc loading results in quieter hover characteristics (Brown and Harris, 2018), which is also a very important parameter for the acceptance of these vehicles by the general public/users.

In the eVTOL universe of design choices, multicopters present some of the lowest disc-loading values, resulting in better hover performance and lower noise levels (in hover). The low disc-loading of the multicopters is generally achieved by using a large number of rotors. However, multicopters are not optimized for cruise flight, presenting very low L/D (lift-to-drag) ratios due to the absence of wings (consequently using the rotors for both lift and thrust). Thus, multicopters are more suitable for short-range/low-speed applications, such as urban air taxi services that will operate within city limits.

The presence of wings (tiltable or not) in the design will significantly increase the cruise performance of the eVTOL in relation to multicopters (Finger, Braun, & Bil, 2017). However, the choice between tilting or non-tilting wings may play an important role in the hover performance of these vehicles. A non-tilting wing may be subjected to downwash from the rotors, considerably reducing hover performance. This is the reason

Author

why, in Figure 12, the *Tilt wing+rotor* presents a relatively better hover performance in relation to both *Tilt Rotor* and *Hybrid Lift+Cruise* designs.

Lift+Cruise designs also pay a huge penalty in cruise flight by carrying the unused vertical motors, and parasite drag occurs due to the stopped vertical rotors.

These convertiplane designs can be equally employed in within-city-limits air service or inter-urban mid-range routes. However, the benefits that come from the use of wings and the possibility of reaching higher speeds may not be apparent on short trips.

At the other extreme, presenting very high disc-loading, combined with the use of wings, is the *thrust vector* design. The Lilium Jet (see Figure 11) is an example of this type of design. The small radius-ducted fans used on the Lilium are tiltable between the hover (vertical thrust) and cruise (horizontal thrust) positions. In the cruise position, this configuration tends to present relatively high lift-to-drag ratios (if compared to other eVTOLs), favoring longer distance/higher speed applications. This design tends to deliver better results in terms of range and maximum speed than *multicopters* or *Hybrid Lift+Cruise* due to the higher L/D figure. However, the higher disc loading may lead to higher noise levels in hover (this may not be the case in cruise flight), which may be a concern for this type of propulsion design choice.

2.5 Challenges to the entry into service of eVTOL aircraft

2.5.1 Type Certification

No aircraft can operate commercially without receiving a TC (type certificate) from a recognized certification authority (such as the FAA, EASA, ANAC or TCCA), and this is also the case for the eVTOL that will be used for UAM services. The FAA and EASA (European Aviation Safety Agency) are the main authorities under which most of the TCs and STCs (Supplementary Type Certification) in the world are issued. Additionally, both entities cooperate closely to maintain a relatively high level of harmonization between their certification regulations. Certification efforts for future eVTOL vehicles that seek to operate in most western countries (including large aviation markets such as the US and Europe) must be made in cooperation with at least one of these two entities.

Unlike military certification/qualification (which is focused on mission requirements), the certification process for civil aircraft (TC or STC) is focused on demonstrating that the design complies with regulations that aim to guarantee the highest level of safety. With this concept in mind, it is expected that a new type of aircraft, such as the eVTOL, will be submitted to considerable scrutiny before being awarded a TC that allows the transport of passengers and therefore commercial operation.

Discussions about the certification basis for these aircraft have already started, but due to the multiple types of designs (see 2.4), the definition of a single certification basis is a huge challenge for applicants (manufacturers) and authorities. The certification basis for an eVTOL aircraft is still not fully defined and must be agreed upon between the manufacturer and the authority based on the specificities of each design.

The autorotation condition for helicopters can be used to illustrate the difficulties of meeting specific certification requirements. Due to the rotor characteristics of most eVTOL multicopters (small radius, low mass), these vehicles will probably not be capable of autorotation, which is a condition under which helicopters must demonstrate they are controllable (FAA/EASA part 27 or 29, paragraph 27.143(a)(2)(v)). eVTOLs

Title

will have difficulties meeting this requirement, but it will be possible for the applicants to demonstrate (by analysis) the high improbability that multiple motors/rotors would fail simultaneously and that the aircraft would need to enter autorotation.

Regarding fixed-wing certification, for example, the original Part 23 (small airplanes) was not suitable for the certification of many of the technologies used on winged eVTOL aircraft, beginning by electric propulsion. Part 23 addressed piston or turbine engines, and electrical motors were not certifiable under it.

Most of the eVTOL designs under development, seeking operation under part 135, present MTOW (maximum takeoff weight) and passenger numbers that fall under part 23 (small airplane) or part 27 (normal category rotorcraft) certification (FAA or EASA). Therefore, it is possible that a mix of part 23 and 27 regulations will be used for the certification of these eVTOL as *special classes of aircraft* (see Figure 13).

The certification process of eVTOL may be addressed by *14 CFR part 21.17(b)* (special classes of aircraft), which defines that for those aircraft “*which airworthiness standards have not been issued...*” the applicable requirements will be “*...portions of those other airworthiness requirements contained in Parts 23, 25, 27, 29, 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*” (FAA, 2018).

As a general rule, to achieve a Type Certification, eVTOL manufacturers must aim to demonstrate a level of safety equivalent to or above that of current airplane and helicopter designs.

The FAA 14 CFR Part 23 regulations were recently passed (effective from August 30, 2017) through a reformulation (amendment 64) that introduced the concept of Consensus Standards for the demonstration of MoC (means of compliance). According to AC23.2010-1 (FAA, 2017), Consensus Standards are “*...Industry developed standards the Administrator has accepted for use as a means of compliance to the part 23 regulations...*”. This means that recognized non-governmental institutions in the aeronautical industry, such as ASTM International and RTCA (Radio Technical Commission for Aeronautics), for example, can work together with manufacturers to propose to the administrator (certification authority) alternative means to demonstrate compliance with part 23 requirements.

EASA has harmonized with amendment 64 of part 23 and issued a revision of the CS-23 (amendment 5), effective since April 1, 2017 (EASA, 2017).

Therefore, eVTOL designs that apply for certification with a part 23 approach/amendment 64 (possible for winged designs), requesting classification under special class (21.17(b)), are more likely to reach certification faster than those taking a part 27 approach (as in the case for the multicopters), in which regulations did not pass through modifications in order to address recent technological innovations (such as DEP).

2.5.2. Other challenges to eVTOL technology

Obtaining a Type Certification is not the only challenge to the entry into service of eVTOL vehicles. This session will just list and briefly introduce some of the main additional challenges. The impact of challenges affecting the practical use of eVTOL in urban air mobility must be subject to further research and analysis.

- Endurance: The energy density (how much energy is available per kg of battery) of chemical batteries is still very low in relation to fossil fuel, ranging from

Author

approximately 100-200 Wh/kg for a typical Li-Ion battery compared to approximately 1600 Wh/kg for kerosene, for example (Tyan et al., 2017). Therefore, to ensure minimum practical endurance, batteries will be responsible for a considerable percentage (up to 30%) of the aircraft's gross weight (Ullman et al., 2017). Hybrid systems (batteries + auxiliary generator) may be used to increase endurance but carry the handicap of producing polluting emissions and additional noise during some phases of the flight.

- Autonomy and Airspace management: most of the solutions proposed for the UAM market are intended to have autonomous flight capabilities (Uber, 2016). This capability aims mainly at lowering the cost of the operation (no pilot on board) and improving the overall safety levels (through a fully automated flight procedure). Additionally, when a large number of these aircraft will be using a tight urban airspace, considerable adaptations need to be implemented in current airspace management systems and rules.
- Pilots licenses: At least in the first years of operation of eVTOL aircraft, pilots will be on board. There is no specific regulation to indicate which type of license will be necessary (and how to obtain it) to fly these aircraft.

3. Conclusions

VTOL is a technical solution that has been under research and development for a long time. However, at the end of the 20th century, new technologies such as composite materials and fly-by-wire digital controls finally made this technology practical. Currently, all operational deployments of this technology have been for military applications because that certification process is simpler and aims to accomplish missions rather than meet safety requirements.

In the last decade, advances in electric propulsion have made eVTOL possible. These new types of air vehicles will rely on DEP (Distributed Electric Propulsion) to achieve lighter, less complex, safer and more environmentally friendly VTOL aircraft. eVTOL aircraft have many advantages over the classic helicopter design, starting with zero emissions of polluting gases during operation and lower noise levels. Greener operation and lower noise levels are some of the characteristics of these vehicles that make them more suitable than helicopters for use in the urban environment.

At present, several companies (and even government agencies) are rushing to develop and certify eVTOL aircraft to meet Urban Air Mobility needs. This rush was triggered by UBER's Elevate initiative (Uber, 2016), which presented a clear vision from the demand point of view through the issue of the white paper entitled *Fast-Forwarding to a Future of On-Demand Urban Air Transportation*.

eVTOL vehicles under development currently vary considerably in their designs. These choices may significantly affect the complexity, performance and certification possibilities of the vehicles. *Multicopters* are the simplest design to be constructed and prototyped and have the best hover performance, but they pay huge penalties in the cruise phase of the flight (just like helicopters). *Convertiplanes* present more complexity in their design, mainly due to tilting components, but they present the best performance in the cruise phase of flight due to the use of their wings to generate 100% of their lift.

eVTOL also has handicaps and challenges with regard to its entry into service in commercial urban air mobility operations. The main technological handicap of eVTOL is

Title

its relatively short endurance due to the very low energy density of currently available batteries. However, short endurance will probably not be a deal-breaker for eVTOL because these vehicles are intended mainly for short distances inside urban perimeters or for short commuter routes.

The main challenge for the entry-into-service of these aircraft (in the opinion of the authors) is considered to be the certification process. As there are no clear civil certification requirements for VTOL or eVTOL aircraft, it is necessary for each manufacturer to agree with national certification agencies (such as FAA, EASA, ANAC and TCCA) regarding the requirements to be fulfilled and the means of demonstrating compliance (because both will strongly depend on the chosen design, e.g., *winged, wingless, tilt rotor/wing*). However, a considerable effort is being made at this moment, among both industry and authorities, to find a common basis on which to certify these aircraft for civilian use. The *14 CFR part 21.17(b) (Special Class of Aircraft)*, together with Amendment 64 of FAR 23 or Amendment 5 of CS23, may be used as the starting point for the certification of some of these vehicles. However, these regulations are applicable to winged designs only, leaving wingless (multicopters) in a gray area concerning an applicable certification basis. Additionally, there seems to be no movement towards a modernization of FAR/CS 27 or 29, a modernization that could resemble that applied to FAR/CS 23.

Therefore, eVTOL designs that apply for certification with a part 23 approach/amendment 64 (possible for winged designs), requesting classification under special class (21.17(b)), are likely to reach certification faster than those taking a part 27 approach (as in the case of multicopters).

It can also be said that although multicopters were among the first eVTOL to fly (including manned flights), and although they present the simplest designs (resulting in faster and cheaper development), they will not necessarily be the first to reach certification and commercial operation in UAM applications.

Author

References

- Abraphe. (2013) *Estudo da Abraphe Confirma São Paulo como Capital Mundial do Helicopter*. Abraphe. <http://www.abraphe.org.br/noticias/estudo-da-abraphe-confirma-sao-paulo-como-capital-mundial-do-helicoptero> (Accessed April 2018).
- Amoroso, S. et al. (2012) 'Helicopter operations: the environmental impact and ground facilities. Procedures and operational standards for the system's acceptance'. Paper presented at the *4th International Conference Heli world 2012: Helicopter Technologies and Operations*.
- Bloomberg. (2016) *Uber Lets You Hail a Helicopter in Brazil for \$63*. Bloomberg <https://www.bloomberg.com/news/articles/2016-06-21/uber-lets-you-hail-a-helicopter-in-brazil-for-63> (Accessed April 2018).
- Borer, N.K. et al. (2016) 'Design and performance of the NASA SCEPTOR distributed electric propulsion flight demonstrator', Paper presented at the *16th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations Conference, AIAA AVIATION Forum, (AIAA 2016-3920)*. AIAA, Washington, D.C.
- Brown, A. and Harris, W. (2018) 'A vehicle design and optimization model for on-demand aviation', Paper presented at the *2018 AIAA/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, AIAA SciTech Forum*. AIAA, Kissimmee, Florida.
- Eurocopter. (2009) 'AS 350 B3 Technical Data'
- EASA, 2017, <https://www.easa.europa.eu/document-library/certification-specifications/cs-23-amendment-5>, (accessed on October 2018)
- Cwerner, S.B. (2006) 'Vertical flight and urban mobilities: the promise and reality of helicopter travel', *Mobilities*, Vol. 1 No. 2, pp.191-215
- FAA. (2015) *Aviation Emissions, Impacts & Mitigation: A Primer*, Office of Environment and Energy, Federal Aviation Administration, Washington, DC.
- FAA, Electronic Code of Federal Regulations, part 135, <https://www.ecfr.gov/cgi-bin/text-idx?SID=377df8d9883787d0a1208a2a858568f8&mc=true&node=pt14.3.135&rgn=div5#sp14.3.135.a>, (accessed on October 2018)
- FAA, Electronic Code of Federal Regulations, part 91, <https://www.ecfr.gov/cgi-bin/text-idx?SID=180f87fac145a1a2ec29c88819398664&mc=true&node=pt14.2.91&rgn=div5>, (accessed on October 2018)
- FAA, Electronic Code of Federal Regulations, part 121, <https://gov.ecfr.io/cgi-bin/retrieveECFR?gp=1&SID=d7c742defc432c8c5023b551336504c1&ty=HTML&h=L&mc=true&n=pt14.3.121&r=PART>, (accessed on October 2018)
- FAA, Electronic Code of Federal Regulations, part 21, <https://www.ecfr.gov/cgi-bin/text-idx?SID=431299fb52ad1aa8d518bba2ed516dc6&mc=true&node=pt14.1.21&rgn=div5>, (accessed on October 2018)
- Finger, D., Braun, C., & Bil, C. (2017). The Impact of Electric Propulsion on the Performance of VTOL UAVs. 66. Deutscher Luft-und Raumfahrtkongress DLRK 2017.
- Fortune. (2018) Say hello to Cora, the new flying taxi from a secretive startup funded by Google's Larry page. <http://fortune.com/2018/03/13/cora-kitty-hawk-flying-taxi-larry-page/> (Accessed April 2018).
- FAA. (2017) *AC No: 23.2010-1, FAA Accepted Means of Compliance Process for 14 CFR Part 23*
- ICAO. (2015) *Helicopter noise reduction technology, status report 0074*, ICAO.
- ICAO. (2018) *Contaminants from Aircraft Engine Emissions*, ICAO. <https://www.icao.int/environmental-protection/Pages/Contaminants.aspx> (Accessed February 2018).
- Old Machine Press (2017). *CTA / ITA Heliconair HC-1 Converteplano*, Old Machine Press. <https://oldmachinepress.com/2017/03/20/cta-ita-heliconair-hc-i-converteplano/> (Accessed April 2018).

Title

- Rothhaar, P. M., Murphy, P. C., Bacon, B. J., Gregory, I. M., Grauer, J. A., Busan, R. C., & Croom, M. A. (2014). NASA Langley Distributed Propulsion VTOL TiltWing Aircraft Testing, Modeling, Simulation, Control, and Flight Test Development. Paper presented at the 14th AIAA aviation technology, integration, and operations conference.
- The Vertical Flight Society. (2018) <http://evtol.news/> (Accessed April 2018).
- Storino, P.J. (2014) Leads continued use in avgas. Law school student scholarship. Paper 622.
- Tyan, M. et al. (2017) Comprehensive preliminary sizing/resizing method for a fixed wing – VTOL electric UAV, *Aerospace Science and Technology*, Vol. 71, pp.30-41
- U.S. Department of Energy. <https://www.fueleconomy.gov/feg/Find.do?action=sbs&id=38680> (Accessed February 2018).
- Uber. (2016) *Fast-Forwarding to a Future of On-Demand Urban Air Transportation*, San Francisco, CA.
- Ullman, D.G. et al. (2017) Comparing electric sky taxi visions.
- Voom. (2018) <https://www.voom.flights/> (Accessed April 2018)
- Walsh, J.L. et al. (1987) Optimization methods applied to the aerodynamic design of helicopter rotor blades, *Journal of the American Helicopter Society*, Vol. 32 No. 4, pp.39-44
- Watkinson, J. (2004) *Art of the Helicopter*, Elsevier Butterworth-Heinemann, Oxford.

Author

Figure Captions

Figure 1. From the Fw 61 to the modern VTOL (FW61 - public domain / V22 Osprey - Naval Air Systems Command / AS350 - freeimages.com/Candice Courtney)

Figure 2. Study localization (source: authors)

Figure 3. The Heliconair HC-1 convertiplane (image credits: public domain)

Figure 4. NASA GL10 Greased Lightning (high levels of DEP) (image reproduced with permission from NASA Langley/David C. Bowman)

Figure 5. Main types of eVTOL designs under development and a qualitative comparison of complexity (source: authors).

Figure 6. Ehang 184 multicopter (a relatively lower complexity eVTOL design) (image reproduced with permission from EHANG).

Figure 7. Volocopter VC200, low disc-loading is similar to helicopters. (image reproduced with permission from Volocopter)

Figure 8. The Kitty-Hawk Cora Hybrid Lift+Cruise (image reproduced with permission from Kitty Hawk Corporation)

Figure 9. The Joby S4 tilt rotor (image reproduced with permission from Joby Aviation)

Figure 10. The Airbus A3 Vahana tilt rotor+wing (image reproduced with permission from Airbus A3)

Figure 11. The Lilium Jet, ducted fan thrust vector design (high disc-loading application of DEP) (image reproduced with permission from Lilium Aviation)

Figure 12. Qualitative comparison of hover versus cruise efficiency for different types of eVTOL propulsion (source: authors).

Figure 13. Certification of eVTOL as special class of aircraft (image reproduced with permission from airplane - freeImages.com/rubenshito / helicopter - freeImages.com/Candice Courtney).

Title

Figures

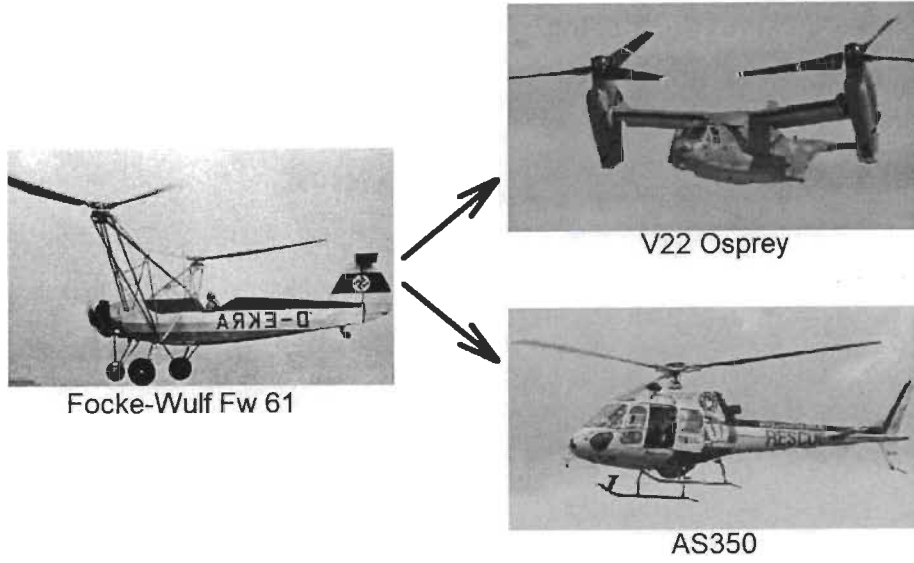


Figure 1.

Author



Figure 2

|

Title

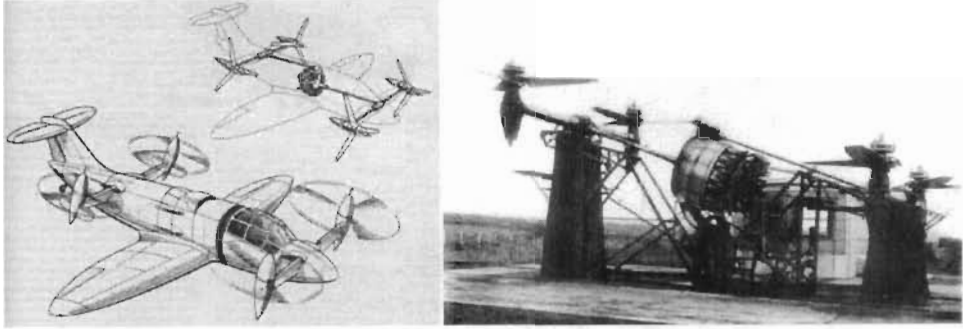


Figure 3

Author



Figure 4

Title

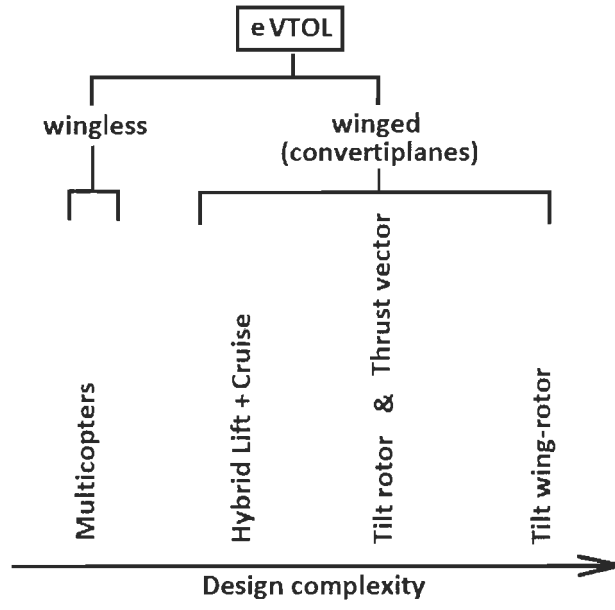


Figure 5

Author



Figure 6

Title

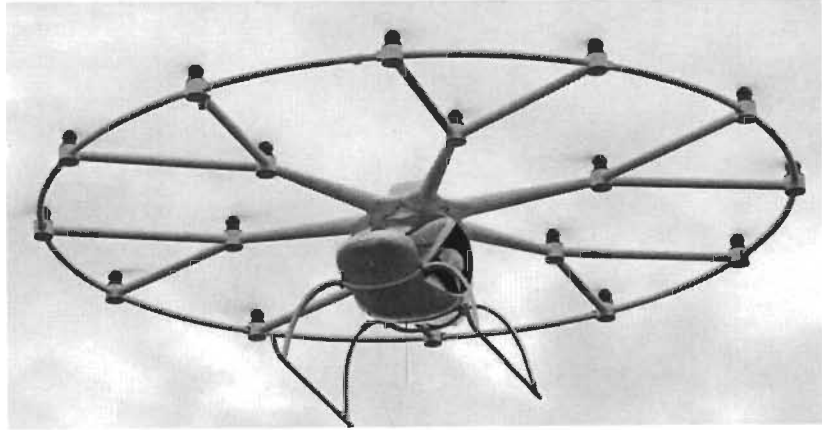


Figure 7

Author

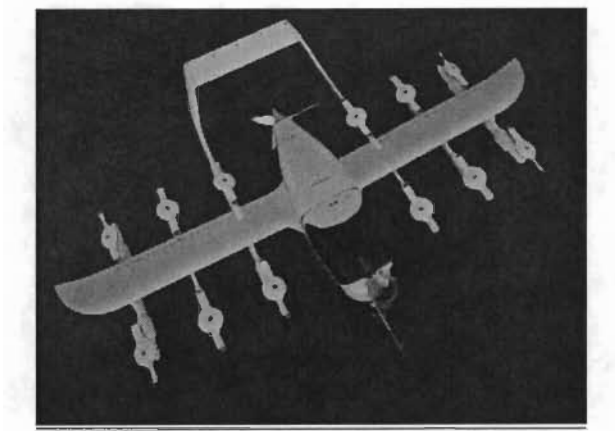


Figure 8. The Kitty-Hawk Cora Hybrid Lift+Cruise

Title



Figure 9 Figure 1. The Joby S4 tilt rotor

Author



Figure 10

Title

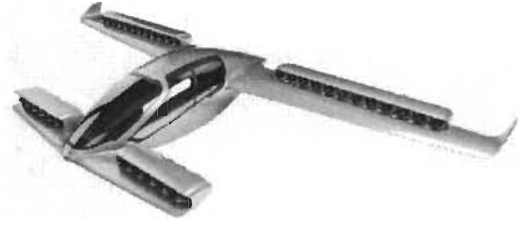


Figure 11

Author

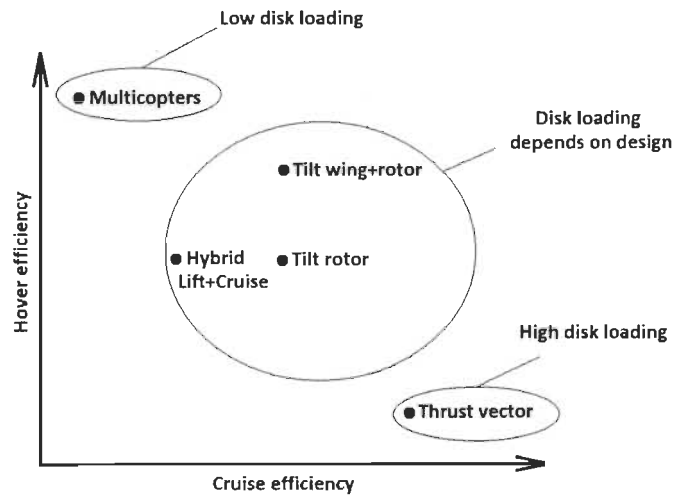


Figure 2

Title

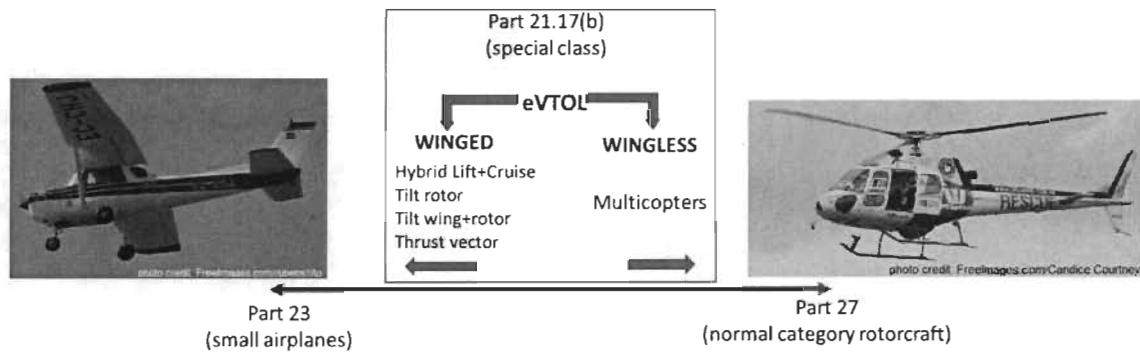


Figure 13