



Le transport urbain aérien de passagers : scénarios de développement du VTOL

Les coulisses de l'Urban Air Mobility : technologies, coûts, réglementations, marchés potentiels, étapes franchies et restant à franchir pour voir émerger le marché du taxi volant

LesEchos
ÉTUDES



Sommaire de l'étude

	Synthèse	5			
1	Périmètre de l'étude et définitions des termes	30	5	Projets de VTOL existants et à venir	74
2	Technologie du VTOL : motorisation, propulsion, batterie et structure de l'aéronef	32	5.1	Zoom sur les principaux projets et partenariats	75
2.1	Motorisations	33	5.2	Cartographie et matrices des projets et partenariats	80
2.2	Batteries	36	6	Initiatives comparées des pays et organisme de régulation	84
2.3	Propulsions et structures de l'aéronef	39	6.1	Principaux pays par brevets	85
3	Règlementation	43	6.2	Dialogues et consultations passés et à venir	87
3.1	Avancées des différents organismes de régulations autour du monde	44	6.3	Zoom sur les villes les plus dynamiques	89
3.2	Rédaction des textes réglementaires en Europe	47	7	Domaines connexes, marchés existants et premières expérimentations	91
3.3	Un cadre plus général de transformation réglementaire	54	7.1	VTOL utilisés pour le transport des biens	92
3.4	La question de l'autonomie	57	7.2	Transport de passagers par hélicoptères	94
4	Coûts, prix, marchés potentiels	58	8	Scénarios de développement Les Echos Etudes	97
4.1	Coûts d'achats : batterie et VTOL	59	8.1	Méthodologie de projection	98
4.2	Coûts d'opération : maintenance et électricité	64	8.2	Scénarios de développement et tailles de marché par segment par zone géographique individuelle	105
4.3	Coûts des infrastructures de charge	69	8.3	Scénarios de développement mondial et tailles de marchés par segment	110
4.4	Services de mobilité	71	9	Interview des experts	111
4.5	Comparaison avec les moyens de transport alternatifs	73	10	Fiches individuelles par projets de VTOL	136
				Annexes – Récentes publications clefs	334

2. Technologie du VTOL

2.1 Motorisation du VTOL

Le moteur électrique du eVTOL : définition et catégories

Moteurs thermiques des avions et des hélicoptères

Avions et hélicoptères fonctionnent généralement⁽¹⁾ avec des moteurs thermiques dont les principes sont opposés



- La soufflante permet au flux d'air de rentrer dans les compresseurs basse et haute pression
- L'air est ensuite mélangé au kérosène et est brûlé dans la chambre à combustion
- Le flux passe ensuite dans les turbines qui entraînent des arbres qui font tourner le compresseur et la soufflante
- Le flux d'air secondaire fait avancer l'avion
- Principe inverse au turboréacteur
- Fournit de la puissance à l'arbre et non pas la force de la poussée
- Ensuite permet de tourner le rotor
- La transmission est alimentée par les turbines qui absorbent l'énergie du gaz chaud et de la haute pression qui circulent sur les pâles
- Le gaz à haute énergie vient de la chambre à combustion : l'air comprimé par différents compresseurs y est mélangé avec du carburant

Différentes catégories de moteurs électriques

Le eVTOL, un aéronef à moteur électrique

- En excluant les VTOL hybrides, les VTOL électriques ou eVTOL sont propulsés par un ou plusieurs moteurs électriques
- Rappelons ci-dessous les différentes catégories de moteurs électriques en illustrant leur usage par le transport automobile

⚡ Deux grandes catégories de moteurs électriques

- Les moteurs à courant continu
- Les moteurs à courant alternatif, eux-mêmes scindés en deux catégories
 - Les moteurs asynchrones
 - Les moteurs synchrones

⚖ Moteurs à courants continus, presque disparus de l'industrie

- Les premiers TGVs étaient pourvus de ce type de moteurs, avant de passer à l'alternatif synchrone
- PSA a également expérimenté ce moteur dans les années 90
- On ne les retrouve aujourd'hui quasiment plus dans l'industrie des transports

📈 Moteurs à courant alternatif, encore tous deux dans la course

- **Le moteur asynchrone** : robuste, peu coûteux mais peu performant, on le retrouve dans les véhicules hybrides où une faible puissance de moteur électrique est suffisante
- **Le moteur synchrone** : aujourd'hui le plus utilisé dans l'industrie automobile - Renault (ZOE, Fluence, Kangoo), Nissan (Leaf), Toyota (Prius), Peugeot (Ion), Bolloré (ex-Autoli'b)
 ➔ à ce jour, les eVTOL significativement avancés sont tous conçus avec des moteurs électriques alternatifs synchrones

2. Technologie du VTOL

2.1 Motorisation du VTOL

Le moteur électrique du eVTOL : bénéfices (hors aspects environnementaux)

Avantages clefs du moteur électrique		Rendement	<ul style="list-style-type: none"> Rendement d'un moteur électrique largement supérieur au rendement du moteur thermique Seuls les frottements sont perdus dans le moteur électrique sans pertes de chaleur Rendement peut atteindre 90-95% contre 30 à 60% pour un moteur thermique
		Poids	<ul style="list-style-type: none"> Poids d'un moteur électrique beaucoup plus faible qu'un moteur thermique Dans le cas d'un véhicule terrestre, il existe un facteur 4 de réduction pour une puissance donnée⁽¹⁾
		Bruit	<ul style="list-style-type: none"> Un moteur électrique est quasiment silencieux comparé à un moteur thermique Attention néanmoins aux annonces, le problème de bruit des hélicoptères est dû aux rotors et non pas aux hélices (voir détails sur le bruit des VTOL dans les slides suivantes)
		Coût	<ul style="list-style-type: none"> Incontestablement un moteur électrique a un coût largement inférieur A titre de comparaison sur une industrie plus mature, un moteur électrique de voiture coute quelques centaines de milliers d'euros à développer contre 5 mds€ pour un moteur thermique⁽²⁾

Rendement	Poids	Coût
<p>+ 90 à 95% Rendement d'un moteur électrique</p>	<p>+ 25 kg Poids d'un moteur de voiture électrique (P=100ch)</p>	<p>+ Quelques 100 k€ Investissement nécessaire pour développer un moteur de voiture électrique⁽²⁾</p>
<p>+ 30 à 60% Rendement d'un moteur thermique</p>	<p>+ 100 kg Poids d'un moteur de voiture essence (P=100 ch)</p>	<p>+ ~5 mds€ Investissement nécessaire pour développer un moteur de voiture à essence⁽²⁾</p>

(1) Exemple pour une puissance de 100 ch
(2) Source PFA