



Un nouveau concept d'aéronef pour améliorer la fiabilité des micro-drones

Aurélien Cabarbaye - André Cabarbaye

XII^{ème} Congrès International Pluridisciplinaire
en Qualité, Sécurité de fonctionnement et Développement durable





Plan



- I. Introduction**
 - II. Réglementation**
 - III. REX sur les incidents**
 - IV. Drones multi rotors**
 - V. Concept du « Rotor Volant »**
 - VI. Avantages du concept**
 - VII. Conclusion**
- Bibliographie**

I. Introduction

- Désignant un aéronef sans pilote à bord mais le plus souvent télécommandé, le drone à usage civil ou militaire n'est pas nouveau puisque le concept naît pendant la Première Guerre mondiale (vol d'un drone torpille dès 1918).
- Son véritable essor est cependant récent avec le développement de drones armés dans les années 1990 aux Etats-Unis (doctrine de « guerre zéro mort »), puis l'émergence d'une exploitation commerciale des drones dans de nombreux pays, dont la France qui bénéficie d'un cadre réglementaire rigoureux.
- Mais le développement rapide des usages, qui devrait s'étendre à la livraison de colis, ne sera socialement acceptable que si les risques engendrés par les drones restent maîtrisés.

II. Réglementation en France

- **Scénarios d'utilisation** (en dehors des activités d'aéromodélisme et d'expérimentation)

	S1	S2	S3	S4
Altitude sol max (m)	150	50 150 < 2 kg	150	50
Distance du pilote max (m)	200	1 000	100	Illimitée
Poids max (kg)	25	25	8	2
En zone peuplée	non	non	oui	non
Vol à vue	oui	non	oui	non

S1 : utilisation hors zone peuplée, sans survol de tiers, en vue et à une distance horizontale maximale de 200 mètres du télépilote.

S2 : utilisation hors zone peuplée, sans tiers au sol dans la zone d'évolution, ne répondant pas aux critères du scénario S-1, à une distance horizontale maximale d'un kilomètre du télépilote.

S3 : utilisation en zone peuplée, sans survol de tiers, en vue et à une distance horizontale maximale de 100 mètres du télépilote.

S4 : utilisation hors zone peuplée ne répondant pas aux critères des scénarios S-1 et S-2

- **Règles de conception imposées**

- Un dispositif automatique programmable empêche l'aéronef de dépasser une altitude ou une hauteur maximale même en cas de commande du télépilote ou du pilote automatique.
- Le télépilote peut forcer un atterrissage d'urgence par arrêt de la propulsion en vol et cette commande peut être testée au sol.

II. Réglementation en France

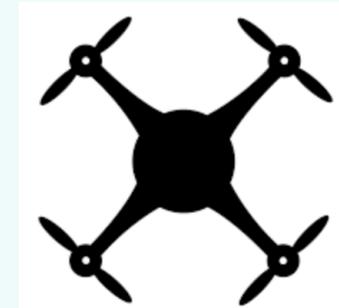
- la perte de la liaison sol-bord entraîne la mise en œuvre d'une procédure d'atterrissage automatique.
- Dans le scénario S2, le dispositif automatique programmable empêche également l'aéronef de franchir des limites horizontales, et l'atterrissage d'urgence peut être activé même en cas de perte des automatismes embarqués de contrôle de la trajectoire.
- Dans le scénario S3 (zone peuplée) les drones de masse supérieure à 2 kg doivent être équipés d'un dispositif de protection des tiers, limitant à 69 joules l'énergie d'impact en cas de crash.
- Ce dispositif de protection est activé en cas d'atterrissage automatique.
- Si la masse du drone est supérieure à 4 kg, la commande de ce dispositif constitue une chaîne indépendante (liaison sol-bord, alimentation, etc.) et son déclenchement provoque l'arrêt de la propulsion de l'aéronef et l'activation d'une alarme sonore.
- Une formation au télépilotage, l'enregistrement des vols et un signalement électronique et lumineux sont imposés aux drones de plus de 800 grammes.
- Les drones de plus de 25 kg doivent être immatriculés.
- Un processus de notification, traitement et suivi des événements de sécurité est imposé à la suite d'accidents ou d'incidents ayant un impact sur la sécurité.

III. REX sur les incidents

- Ecrasement spectaculaire d'un drone lors de la descente de slalom de Madonna di Campiglio par le skieur Marcel Hirscher en 2015.
- Quelques accidents mortels recensés (modèles réduits d'hélicoptères radiocommandés).
- Les Evénements Redoutés (ER) peuvent être classés en trois catégories :
 - sortie intempestive du domaine de vol autorisé,
 - crash au sol avec ou sans fonctionnement d'un dispositif « fail safe »,
 - collision ou approche de trop près d'un objet ou d'un individu.
- Les causes des ER peuvent être liées à une défaillance de l'aéronef, une perte de la liaison sol-bord ou à une erreur de pilotage.

IV. Drones multi rotors

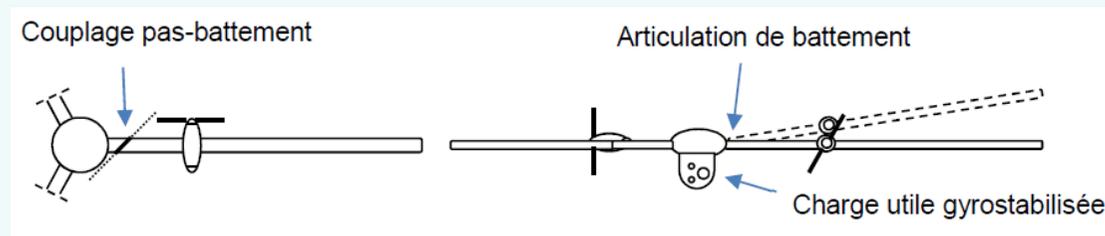
- Prépondérants dans la famille des micro-drones
 - Simples par rapport aux hélicoptères
 - Absence de plateau cyclique
 - Elimination du couple de lacet par une rotation des hélices en sens contraire
 - Mais intrinsèquement peu fiables
 - Stabilité mise à mal en cas de perte de l'un des rotors (désolidarisation de l'hélice, panne de moteur ou de sa commande, collisions diverses, perte du contrôle de vol, etc.)
 - Usure du système propulsif favorisée par l'emploi d'hélices de sustentation imposant un couple de motorisation nettement plus important que pour des hélices propulsives
 - Vitesses de rotation élevées susceptibles d'occasionner des blessures au sol ou en vol
 - En dépit des divers travaux scientifiques cherchant à pallier cette faiblesse (7 & 8)
 - Contrôle élaboré assurant le maintien en vol dans certaines configurations de défaillances dans un mode de fonctionnement très dégradé (difficilement acceptable dans le cadre d'un processus de certification)
 - Nécessite une augmentation substantielle de la puissance de motorisation par rapport au besoin (pénalité en masse).



V. Concept du « Rotor Volant »

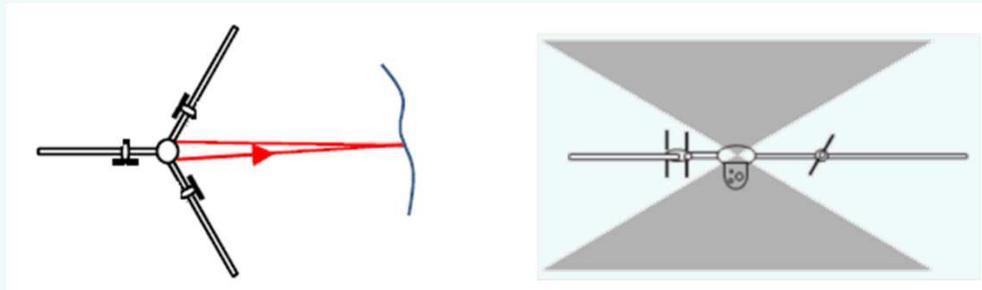
- Concept breveté d'aéronef

- Rotor entraîné en rotation par un système propulsif installé sur ses pales.
- Mouvement horizontal résultant d'une commande différenciée des propulseurs durant un tour du rotor.
- Stabilité assurée par une articulation libre de battement permettant d'équilibrer la portance et le poids de chacune des pales quelle que soit sa vitesse par rapport à la masse d'air ambiante.
- Articulation combinant incidence et battement pour compenser le différentiel de vitesse entre une pale se déplaçant dans le même sens que l'aéronef et une pale se déplaçant dans le sens contraire.
- Module gyrostabilisé dans l'axe du rotor permettant l'emport d'une charge utile immobilisée en rotation (caméra...).



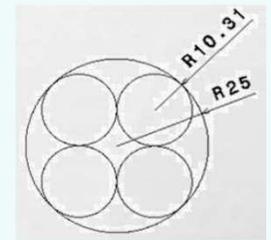
V. Concept du « Rotor Volant »

- Scanner 3D à composants liés (strap-down) de type Lidar (laser detection and Ranging) et Sonar (sound navigation and ranging) intégré dans le rotor pour détecter les obstacles.
- Capteurs additionnels pour en limiter la zone aveugle (deux cônes verticaux) et complémentarité des technologies utilisées pour en renforcer l'efficacité (vitre, poussière, grillage...).



VI. Avantages du concept

- Amélioration des performances en masse de charge utile et/ou durée de la mission
 - Rendement additionnel des hélices propulsives compensé par l'augmentation de 47 % de la surface du rotor par rapport à celles des hélices inscrites dans le cercle correspondant (théorie de Rankine Froude)
 - Interférences inter rotors supprimées ainsi que la traînée de la structure dans leur souffle.
 - Trainée d'avancement limitée à celle du rotor par la suppression de tout élément du fuselage.
 - Allègement significatif de l'aéronef (masse de structure, moteurs et hélices, etc.).
- Fiabilité et robustesse
 - La perte partielle de la motorisation (un ou deux propulseurs) conduit à un fonctionnement dégradé et sa perte complète entraîne une descente en autorotation limitant l'énergie d'impact au sol (sans parachute ou airbag)



	Configuration				
	Nominal	Mode peu dégradé	dégradé	Mode très dégradé	Chute libre
Quad	4/4			1/4; 2/4; 3/4 *	0/4
Hexa	6/6	4/6; 5/6			0/6; 1/6; 2/6; 3/6
Rotor volant	3/3	2/3	1/3	0/3	

	Probabilité				
	Nominal	Mode peu dégradé	dégradé	Mode très dégradé	Chute libre
	Panne d'un propulseur :				5,00E-03
	hr ⁻¹				
Quad	9,80E-01			1,99E-02	6,25E-10
Hexa	9,70E-01	2,96E-02			2,47E-06
Rotor volant	9,85E-01	1,49E-02	7,46E-05	1,25E-07	

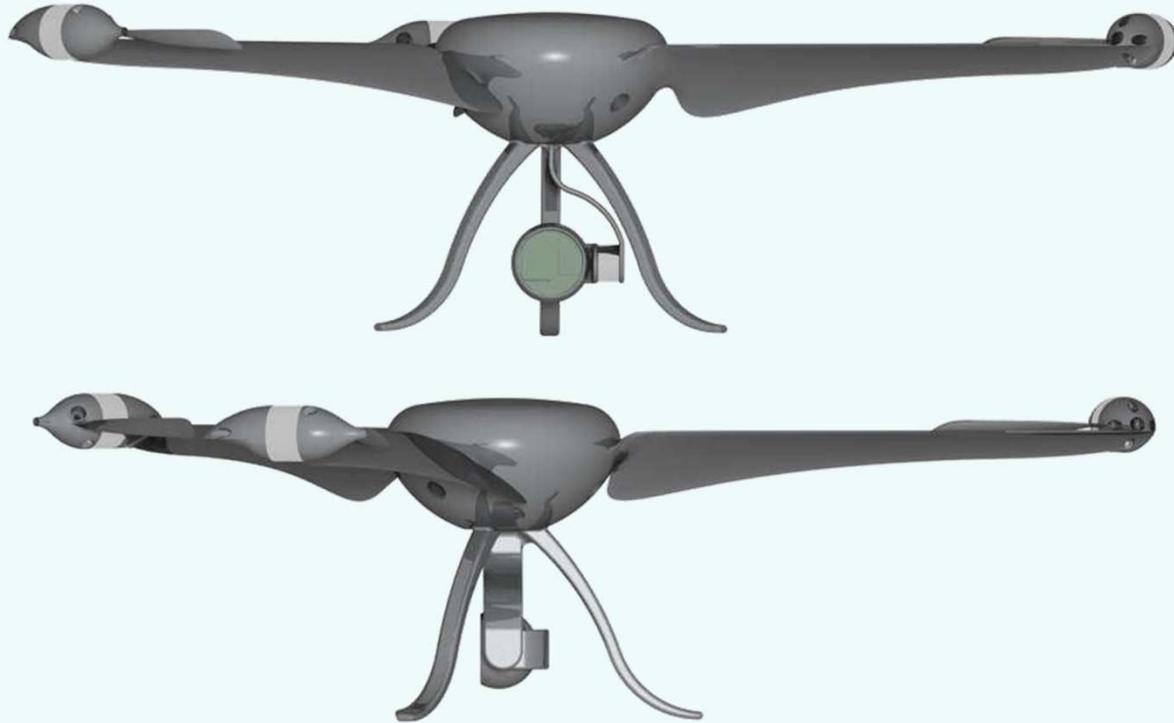
* Mode dégradé revendiqué dans un article scientifique (8)

VI. Conclusion

- L'usage opérationnel des micro-drones se développe rapidement mais ne pourra être accepté socialement que si les risques restent maîtrisés.
- En dépit de récentes améliorations (passivation de certaines pannes par contrôle des moteurs), les drones multirotors restent intrinsèquement peu fiables.
- Cette faiblesse disparaît avec le concept du « rotor volant » susceptible d'offrir aux drones la fiabilité et la sécurité requises, outre l'apport de performances en masse de charge utile et/ou durée de mission.
- Ce nouveau concept d'aéronef se décline dans toutes les tailles et dans des secteurs variés :
 - Domaine spatial : drones martiens, relais stratosphériques, moyens de descente contrôlée de charge utile de ballons,
 - Applications extérieures (outdoor) : micro-drones, portage de charges lourdes, lutte contre les incendies,
 - Applications intérieures aux bâtiments (indoor) : drones plus ou moins autonomes dédiés à la sécurité (services de secours, police, gendarmerie, défense nationale...).

1. Arrêté du 11 avril 2012 relatif à l'utilisation de l'espace aérien par les aéronefs qui circulent sans personne à bord.
2. Arrêté du 17 décembre 2015 relatif à la conception des aéronefs civils qui circulent sans personne à bord, aux conditions de leur emploi et aux capacités requises des personnes qui les utilisent
3. Arrêté du 17 décembre 2015 relatif à l'utilisation de l'espace aérien par les aéronefs qui circulent sans personne à bord
4. Loi n° 2016-1428 du 24 octobre 2016 relative au renforcement de la sécurité de l'usage des drones civils
5. Brevet d'invention FR.16.52349 : Aéronef à voilure tournante, déposé le 18 mars 2016 par le centre National d'Etudes Spatiales (CNES) avec 3 inventeurs (Aurélien Cabarbaye, Adrien Cabarbaye et André Cabarbaye)
6. Helicopter theory (Johnson, Wayne), 2012, Courier Corporation.
7. Reliability analysis of multicopter configurations based on controllability theory (Shi Dongjie, Yang Binxian, Quan Quan), Control Conference (CCC), 2016 35th Chinese.
8. Relaxed hover solutions for multicopters: Application to algorithmic redundancy and novel vehicles (Mueller Mark W, D'Andrea Raffaello).
9. A. Cabarbaye, De la quantification du risque à l'optimisation des systèmes, collection la fiabilité en pratique, Cab Innovation éditeur, 2017.

Prototype





Prototype



Aurélien Cabarbaye - André Cabarbaye



Prototype



Caractéristiques	
Diamètre ouvert	50 cm
Masse	800 gr
Temps de vol	45 min
Charge utile	Visible, IR...
Hauteur replié	25 cm
Diamètre replié	9 cm