

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

Aurélien Cabarbaye
LAFMIA UMI 3175
Mexico
ISAE SUPAERO
Toulouse

André Cabarbaye
Centre National d'Etudes Spatiales (CNES)
Toulouse
CAB INNOVATION
Toulouse

Résumé - L'utilisation opérationnelle des micro-drones se développe actuellement dans de nombreux pays, notamment en France qui bénéficie d'un cadre de réglementation rigoureux. Mais ce développement rapide des usages, qui devrait prochainement couvrir la livraison de colis, ne sera socialement acceptable que si les risques engendrés par les drones restent maîtrisés. Or, les aéronefs majoritairement utilisés pour les nouveaux services sont de type multirotor, une formule intrinsèquement peu fiable. Un nouveau concept d'aéronef de type giravion, le « rotor volant », présente de meilleures performances en termes de masse de charge utile et/ou de durée de la mission et offre surtout de très bonnes caractéristiques en fiabilité et sécurité.

Abstract - Operational use of micro-drones is currently booming in many countries around the world and particularly in France where specific laws were put in place. This rapid development and diversification of uses, which will soon include package delivery, will only sustain and be tolerated if risks they entail remain under control and can be mitigated. However, the majority of current aircraft is based on the multirotor design which is intrinsically unreliable. A new rotorcraft-type drone concept called "flying rotor" has much better performance in terms of payload mass and mission duration but above all outpaces competitors in terms of reliability and safety.

Mots clés — drone, fiabilité, sécurité, Rotor volant, quadrotor, multirotor

I. INTRODUCTION

Désignant un aéronef sans pilote à bord mais le plus souvent télécommandé, le drone à usage civil ou militaire n'est pas un objet nouveau puisque le concept naît pendant la Première Guerre mondiale avec notamment le prototype de drone-torpille (Kettering Bug) développé par la Dayton-Wright Company, qui vola en 1918. Mais son véritable essor est relativement récent avec le développement de drones armés dans le cadre de la doctrine de la guerre « zéro mort » des Etats Unis dans les années 1990, puis l'émergence de l'exploitation commerciale des drones popularisée par la livraison d'un premier colis le 7 décembre 2016 par la société Amazon.

Le marché du drone est aujourd'hui en pleine expansion. D'après une étude publiée par le cabinet Oliver Wyman, le marché des drones civils en France pourrait s'élever à 652 millions d'euros en 2025, contre 155 millions d'euros en 2015, avec une part prépondérante du marché professionnel par

rapport à celui du loisir, recouvrant notamment le secteur de la surveillance et de la sécurité.

Ce développement rapide des drones s'inscrit dans le cadre d'une réglementation nouvelle et évolutive qui tente de définir un encadrement juridique en réponse à divers incidents (crash, collision, vol à proximité d'avion, survol de sites sensibles, etc.), sans pour autant freiner le développement d'un secteur économique naissant dans lequel certaines entreprises françaises ont des positions dominantes, tant dans le domaine des équipements que dans celui des services.

C'est dans ce contexte foisonnant que le Centre National d'Etudes Spatiales (CNES) s'intéresse à diverses applications des drones, dont notamment un drone martien évoluant dans une atmosphère particulièrement ténue, équivalente à celle de la Terre à 30 km d'altitude, à l'instar du projet « Mars Helicopter » de la Nasa.

II. LA REGLEMENTATION

La France a été pionnière en la matière avec la mise en place d'une réglementation dès 2012 [1]. Deux nouveaux arrêtés en date du 17 décembre 2015 réglementent le droit des drones en France depuis le 1er janvier 2016 [2] [3]. Ceux-ci ont supprimé les catégories d'aéronefs pour ne retenir que des classes de masses au décollage. Ils séparent également les activités en aéromodélisme, expérimentations et activités particulières. Dans cette dernière catégorie, les drones ne peuvent être utilisés que dans le cadre de quatre scénarios dont les caractéristiques et limitations sont indiquées à la figure 1. La réglementation impose, par ailleurs, des règles de conception pour des raisons de sécurité. Les principales exigences sont appelées ci-dessous.

- 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.
- 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 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.

	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

Figure 1 – Scénarios pour les activités particulières.

Une nouvelle loi est venue renforcer la sécurité de l'usage des drones civils en 2016 [4]. Celle-ci requiert l'immatriculation des drones de plus de 25 kg et impose l'enregistrement des vols, une formation au télépilotage et un signalélectronique et lumineux pour les drones de plus de 800 grammes. Elle réprime, par ailleurs, l'usage illicite ou malveillant de drones.

III. RISQUES ET RETOUR D'EXPERIENCE SUR LES INCIDENTS

Si des modèles réduits radiocommandés d'hélicoptère ont déjà été la cause d'accidents mortels (notamment deux en 2013), l'écrasement d'un drone quelques centièmes de seconde après le passage du skieur Marcel Hirscher, lors de la descente de slalom de Madonna di Campiglio en 2015, a braqué les projecteurs médiatiques sur les risques liés à l'usage des drones. Le retour d'expérience dans le domaine se construit peu à peu, notamment en France avec l'arrêté du 17 décembre 2015 qui impose un processus de notification, traitement et suivi des événements de sécurité aux pilotes, exploitants et constructeurs, à la suite des accidents ou incidents ayant un impact sur la sécurité. Adressé à la DSAC (Direction de la Sécurité de l'Aviation Civile) ou au titulaire de l'attestation de conception, le compte rendu d'incident doit s'inscrire dans une typologie d'événements conformément aux préconisations d'un

guide édité en mai 2016. Ayant pour objet d'accompagner l'appropriation d'une culture de sécurité, en accord avec la réglementation, ce guide préconise l'utilisation de la classification d'événements redoutés de la figure 2.

- Le drone s'approche trop près d'un groupe de personnes par suite d'un défaut d'attention du pilote.
- Le drone s'approche trop près d'un aéronef habité en vol, sans défaillance technique.
- Le drone s'élève à plus de 150m du sol par suite d'une perte du lien de commande/contrôle.
- Le drone est détruit à l'atterrissage par suite d'un comportement inattendu de celui-ci.
- Le drone pénètre dans le périmètre interdit autour d'un aérodrome, sans défaillance technique.
- En scénario S1, un drone est détruit suite à une panne subite d'alimentation, dans le périmètre prévu de vol.
- En scénario S2, un drone échappe à tout contrôle, poursuit sa route en vol autonome et survole un territoire fortuitement désert, mais non prévu dans l'étude de sécurité.
- En scénario S3, crash au sol, sans fonctionnement d'un dispositif « fail safe » requis, avec ou sans tiers exposé.

Figure 2 – Classification d'événements redoutés.

Cette classification peut être synthétisée en trois catégories d'événements :

- 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 de ces événements peuvent être liées à une défaillance de l'aéronef, une perte de la liaison bord sol ou à une erreur de pilotage.

IV. FAIBLESSE DES DRONES MULTIROTOR

Les drones multirotor occupent une place prépondérante dans la famille des micro-drones en raison de leur capacité au vol stationnaire et d'une rusticité permettant une production à bas cout. La sustentation de ces aéronefs à voilure tournante est généralement assurée par quatre rotors placés aux quatre sommets d'un carré. Deux hélices tournent dans un sens et les deux autres dans le sens opposé afin que l'appareil ne tourne pas sur lui-même par un couple de lacet. Le fonctionnement d'un quadrirotor est relativement simple par rapport à celui d'un hélicoptère :

- la montée et la descente sont obtenues en faisant varier la vitesse des quatre moteurs,
- le mouvement de lacet est obtenu en augmentant la vitesse des hélices tournant dans le sens inverse à celui souhaité et en diminuant proportionnellement la vitesse des hélices tournant dans le sens opposé,
- le mouvement de roulis ou de tangage est obtenu en augmentant la vitesse d'une hélice et en diminuant proportionnellement la vitesse de l'hélice opposée.

Le nombre de rotors peut être supérieur à quatre et les dispositifs de propulsion sont parfois dotés de deux hélices contrarotatives afin d'éliminer le couple de lacet.

Sur le plan de la fiabilité, la principale faiblesse des drones quadricoptère vient de la complémentarité de leurs systèmes propulsifs. En effet, leur stabilité est immédiatement mise à mal en cas de perte de l'un des rotors, ce qui conduit à des trajectoires chaotiques ou à la perte de sustentation. L'aéronef tombe alors comme une pierre.

Cette perte de rotor peut être générée par une défaillance du système propulsif ou de sa commande (désolidarisation de l'hélice, panne de moteur, perte du contrôle de vol, etc.) mais être aussi due à une cause extérieure telle qu'une collision avec un objet au sol (arbre, immeuble, etc.) ou en l'air (oiseau, projectile, etc.). Par ailleurs, le risque de panne ou d'usure du système propulsif est favorisé par l'emploi d'hélices de sustentation qui impose une motorisation ayant un couple nettement plus important que celui utilisé pour des hélices propulsives, et dont la fiabilité est contrainte par la nécessité d'allègement pour pouvoir être embarqué. De plus, l'emploi d'hélices de taille réduite pour générer la portance impose des vitesses élevées pour éviter un fonctionnement à bas Reynolds. De l'ordre de 10 000 tours/min, ces vitesses sont susceptibles d'occasionner des blessures en cas de collision ou durant la mise en route des drones au sol.

Certains travaux scientifiques [8] cherchent cependant à pallier cette faiblesse intrinsèque des multi rotors par un contrôle élaboré de la motorisation. Ce dernier permet le maintien en vol d'un quadricoptère dans certaines configurations de défaillances dans un mode très dégradé, acceptant que la

machine puisse tourner sur elle-même à des vitesses relativement élevées. Outre la difficulté à faire accepter ce type de solution dans le cadre d'un processus de certification, celle-ci nécessite une augmentation substantielle de la puissance de motorisation par rapport au besoin nominal (puissance unitaire des moteurs multiplié par huit pour pouvoir contrer la perte de trois moteurs) et donc un surdimensionnement de l'ensemble du groupe moto propulsif qui se traduit par une augmentation significative du poids. Par ailleurs, ce type de contrôle ne peut rien contre la perte de la totalité de la motorisation (pas de possibilité de descente en autorotation) conduisant à l'obligation réglementaire d'intégrer un dispositif de protection des tiers sur les drones de masse supérieure à 2 kg.

La multiplication des systèmes propulsifs (hexarotor) est également une voie choisie par certains [7] pour réduire l'impact des défaillances unitaires et faciliter leur passivation. Mais cette voie conduit à une pénalité en masse importante et ne résout pas la problématique de perte totale de propulsion. Cette solution de sécurisation conduit, par ailleurs, à une défiabilisation du système propulsif par le nombre des moteurs embarqués comme le montre la figure 3.

Celle-ci présente les configurations de propulseurs dans les divers modes de fonctionnement avec les probabilités d'occurrence correspondantes par heure de vol (loi binomiale), en considérant une probabilité de panne d'un propulseur (moteur + commande + hélice) de $5 \cdot 10^{-3} \text{ h}^{-1}$.

Il est à noter qu'une réduction du nombre de moteur conduit à une amélioration de la fiabilité du système. Le nouveau concept présenté dans le chapitre suivant tire parti de cet avantage.

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					
					hr ⁻¹
Panne d'un propulseur :					5,00E-03
	Nominal	Mode peu dégradé	dégradé	Mode très dégradé	Chute libre
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	

Figure 3 – Fiabilité liée aux pannes des propulseurs

V. LE CONCEPT DU « ROTOR VOLANT »

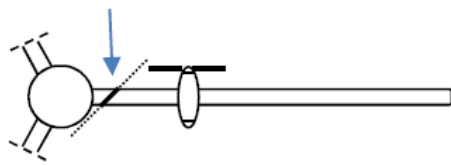
Le « rotor volant » est un nouveau concept d'aéronef de type giravion qui vient d'être breveté par le CNES [5]. Illustré par la figure 4, celui-ci est uniquement constitué d'un rotor entraîné en rotation par un système propulsif installé sur ses pales. Le mouvement horizontal de l'aéronef résulte d'une commande différenciée entre les propulseurs durant un tour du rotor. La stabilité est assurée par une articulation libre de

battement qui permet d'équilibrer la portance et le poids de chacune des pales quelle que soit sa vitesse par rapport à la masse d'air ambiante. Constitué des systèmes propulsifs mais aussi du stockage d'énergie (piles, batteries d'accumulateurs...), la plupart des éléments pesants de l'aéronef est intégrée dans les pales. L'articulation de battement combine judicieusement incidence et battement afin que le différentiel de vitesse entre une pale se déplaçant dans le sens du déplacement de l'aéronef et une pale se déplaçant dans

le sens contraire puisse être compensé. Un module gyrostabilisé dans l'axe du rotor permet l'emport d'une charge

utile immobilisée en rotation (caméra...).

Couplage pas-battement



Articulation de battement

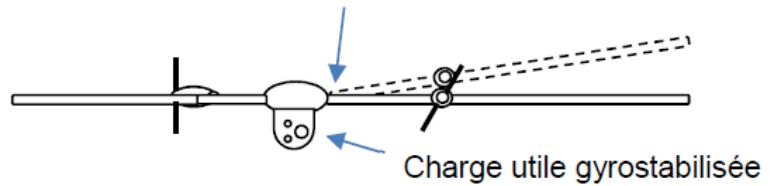


Figure 4 – Concept du rotor volant

Afin de détecter des obstacles, un scanner 3D à composants liés (strap-down) de type Lidar (laser detection and Ranging) ou Sonar (sound navigation and ranging) peut être directement intégré dans le rotor. Celui-ci peut être associé à d'autres capteurs afin d'en limiter la zone aveugle constituée de deux cônes verticaux, comme l'illustre la figure 5. Par ailleurs, la

complémentarité des technologies utilisées pour ces capteurs en renforce l'efficacité. Ainsi, la précision et la capacité de mesure de distance éloignée du Lidar peuvent être mises à défaut par la présence d'une vitre à proximité de l'aéronef qui sera, en revanche, détectée par un sonar.

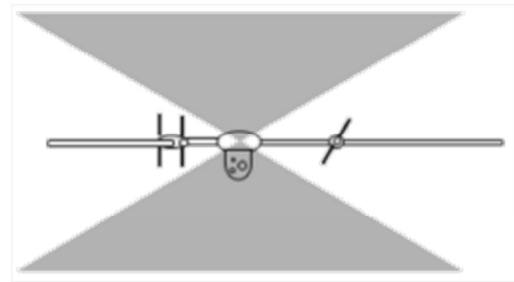
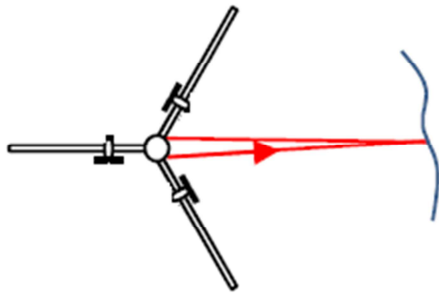


Figure 5 – Intégration d'un scanner 3D dans le rotor

VI. AVANTAGES DU CONCEPT

Par rapport à un drone multiroteur de dimensions équivalentes, le concept du « Rotor volant » présente des avantages en termes de performance. La masse de charge utile et/ou la durée de la mission s'avèrent, en effet, supérieures pour les raisons suivantes :

- Le rendement additionnel des hélices propulsives est compensé par l'augmentation de 47 % de la surface du rotor par rapport à celles des hélices inscrites dans le cercle correspondant, comme l'illustre la figure 6. Cet apport se calcule simplement par la théorie de Rankine Froude [6].
- Les interférences inter rotors sont supprimées ainsi que la traînée de la structure dans leur souffle.
- La traînée d'avancement est limitée à celle du rotor par la suppression de tout élément du fuselage.
- L'aéronef est significativement allégé (masse de structure, moteurs et hélices, etc.).

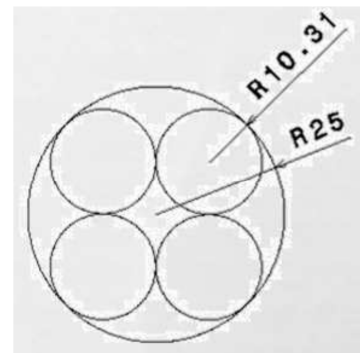


Figure 6 – Disques du rotor et des hélices

Par ailleurs, le concept de « Rotor Volant » s'avère intrinsèquement plus fiable :

- La perte complète de la motorisation conduit à une descente en autorotation à vitesse verticale réduite. La limitation à 69 joules de l'énergie d'impact en cas de crash,

imposée par la réglementation dans le scénario S3, est alors assurée sans nécessiter l'ajout de matériels additionnels (parachute ou airbag), et cette protection s'active naturellement en cas d'atterrissage automatique.

- La perte partielle de la motorisation (un ou deux propulseurs parmi les trois) conduit à des fonctionnements dégradés permettant, selon le nombre de défaillances et la puissance des moteurs embarqués, de poursuivre la mission, l'abréger et faire revenir le drone en un lieu où il peut être récupéré par le télépilote, ou assurer, au minimum, une descente contrôlée de l'engin jusqu'au sol.

De plus, le couple des moteurs est significativement plus faibles que celles des drones multirotor. Elles exposent moins les personnes aux risques de blessures en cas de collision ou durant la mise en route des engins au sol.

Par ailleurs, le risque de collision ou d'approche de trop près d'un objet ou d'un individu, engendré par une erreur de pilotage, une perte de la liaison bord sol ou une défaillance de l'aéronef, peut être fortement diminué par l'emport d'un scanner 3D à bord. Une distance de sécurité est alors assurée en permanence par le système de contrôle de vol, voire par une chaîne de sécurité indépendante. Maintenu dans le cadre de vols en plein air (outdoor) ou effectués à l'intérieur de bâtiments (indoor), cette distance de sécurité n'est pas nécessairement une valeur fixe mais peut varier selon la vitesse du drone dans le plan correspondant.

Intégrer dans le rotor, sans nécessiter l'embarquement d'actuateurs particuliers (miroir tournant) ni être gêné par la présence d'éventuels appendices dans le champ de vision, un tel scanner 3D ne doit pas présenter de risque pour les personnes, notamment dans le cas d'un Lidar utilisant une source laser. La puissance de cette dernière doit être limitée et son alimentation peut être inhibée par une sécurité à l'arrêt et aux faibles vitesses du rotor au sol et en vol.

Dans la classification des événements redoutés du paragraphe II, établie à partir de la réglementation et du guide de notification des incidents de la DGAC, ceux concernant la collision et le crash au sol sont alors bien maîtrisés en cas de défaillance de l'aéronef, perte de la liaison bord sol ou erreur de pilotage. Constituant la dernière catégorie identifiée d'événements redoutés, la sortie intempestive du domaine de vol autorisé est normalement empêchée par un dispositif automatique programmable imposé par la réglementation. Mais l'inhibition volontaire ou involontaire (mauvaise programmation) de cette sécurité est un événement relativement probable qui ne peut être négligé. Aussi, la fiabilité d'un tel dispositif peut-elle être renforcée en remplaçant sa programmation manuelle par une programmation entièrement automatique fondée sur une mesure en continu de la pression atmosphérique, initiée au moment du décollage, ainsi qu'une mesure de la distance de l'aéronef à l'interface de contrôle de l'autopilote, réalisée en permanence par moyen radio.

VII. CONCLUSION

L'usage opérationnel des micro-drones se développe rapidement dans les domaines de la surveillance et de la sécurité et pourrait s'étendre et se densifier prochainement avec l'apparition de nouveaux services tels que la livraison de colis, d'abord en zone inhabitée puis progressivement à proximité des villes. En dépit d'une réglementation mature dans notre pays, bien que toujours évolutive, les risques associés vont donc naturellement s'accroître ainsi que le nombre d'accidents qui restent encore rares à ce jour. Le développement des usages ne pourra être accepté socialement que si les risques engendrés par les drones restent maîtrisés à des niveaux équivalents voire inférieurs à ceux qui sont atteints par l'aviation civile compte tenu du nombre d'engins mis en œuvre.

Majoritairement utilisés aujourd'hui pour répondre aux nouveaux services, les drones multirotor présentent des faiblesses liées à la complémentarité des systèmes propulsifs, qui les rendent difficilement compatibles avec la multiplication des usages. Certes des améliorations peuvent être apportées telles que la passivation de certaines défaillances par le contrôle des moteurs, la redondance des chaînes de vol, la sécurisation des fixations d'hélice, le suivi en vol de bonne santé des moteurs et la maintenance prédictive de ces derniers (Health Monitoring), mais leurs défauts intrinsèques peuvent s'avérer rédhibitoires.

Ces faiblesses disparaissent avec le concept du « rotor volant » qui, outre l'apport de performances accrues en termes de masse de charge utile et/ou de durée de mission, est susceptible d'offrir aux drones la fiabilité et la sécurité requises, notamment quand ceux-ci sont dotés d'un système anticollision réalisé par un scanner 3D facile à embarquer.

Ce nouveau concept d'aéronef se décline dans toutes les tailles et dans des secteurs variés, allant du domaine spatial, avec des projets de drones martiens, de relais stratosphériques, de moyens de descente contrôlée de charge utile de ballons, aux applications terrestres extérieures (outdoor), avec les micro-drones mais également des drones de plus grandes tailles utilisés pour le portage de charges lourdes ou la lutte contre les incendies, ou intérieures aux bâtiments (indoor) avec des drones plus ou moins autonomes dédiés à la sécurité, susceptibles d'aider les équipes de la sécurité civile (pompiers, secouristes, etc.) dans la recherche de survivants lors de catastrophes (incendie, tremblement de Terre, etc.) ou les forces spéciales (police, gendarmerie, défense nationale) dans leur lutte contre les actes terroristes.

REFERENCES

- [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).