



# Sécurisation des drones légers

## Securing light drones

Cabarbaye Aurélien

*Cab Innovation*

3, rue de la Coquille, Toulouse  
aurelien.cabarbaye@gmail.com

*Cabarbaye André*

*Cab Innovation*

3, rue de la Coquille, Toulouse  
andre.cabarbaye@gmail.com

**Résumé** — L'objet de cette communication est de sécuriser les drones légers et leurs opérations de manière efficiente, sans chercher à réutiliser les techniques classiques de l'aéronautique qui se révèlent souvent inadaptées. Elle montre notamment que le suivi de bonne santé et la maintenance prévisionnelle ne concernent pas seulement des systèmes complexes mais peuvent paradoxalement simplifier les drones légers. Elle présente une application de la méthode SORA préconisée par l'agence européenne EASA pour sécuriser les opérations de drone dans la catégorie spécifique et obtenir leur agrément par les autorités de l'aviation civile. Elle illustre son propos par l'exemple d'un drone innovant de très grande élévation (Cabiota ®).

**Mots-clefs** — *Drone, fiabilité, Sécurité, SORA, Prédictive*

**Abstract** — The purpose of this communication is to secure light drones and their operations efficiently, without seeking to reuse conventional aeronautical techniques which often prove to be unsuitable. It shows in particular that health monitoring and predictive maintenance do not only concern complex systems but can paradoxically simplify light drones. It presents an application of the SORA method recommended by the European agency EASA to secure drone operations in the specific category and obtain their approval from the civil aviation authorities. It illustrates his point with the example of an innovative ultra-high elongation drone (Cabiota ®).

**Keywords** — *UAV, Reliability Safety, SORA, Predictive*

### I. INTRODUCTION

Les drones démontrent en Ukraine leur capacité face à une puissante armée conventionnelle. Cette importance stratégique semble avoir été sous-estimée par nos responsables de l'armement qui privilégiaient jusqu'alors d'autres schémas venus d'Outre-Atlantique (grands drones MALE) et viennent de lancer un appel à projets pour la mise au point de drones à bas coût de 5 à 50 km de portée. Ce constat avait déjà été fait par la Cour des comptes dans son rapport annuel de 2020 qui n'épargnait alors ni les pouvoirs publics, incapables de favoriser une filière industrielle, ni les militaires, en retard d'une guerre technologique et pris en défaut d'une vision stratégique, ni les industriels plus concurrents et rivaux que partenaires.

Dans le domaine civil, les attentes suscitées au début du siècle par les aéronefs sans pilote tardent à se concrétiser en termes de services opérationnels, en dépit de leurs intérêts multiples au niveau sociétal et environnemental pour notre pays (observation des sols, surveillance terrestre et maritime,

secours en mer, lutte contre les incendies, désenclavement des territoires, urgence médical, transport de colis, etc.).

Notre industrie et notre recherche académique en aéronautique pâtissent de cette désaffection et accumulent du retard dans un domaine qui devrait pourtant être privilégié, car l'absence de pilote à bord permet bien des audaces sur le plan aérodynamique, systémique et des techniques de fabrication.

Certes, un drone présente des risques relatifs à la sécurité des personnes et des biens, en cas de chute au sol ou de collision avec un autre usager de l'espace aérien..

Mais ces risques peuvent être maîtrisés dans le cadre de la nouvelle réglementation européenne des drones qui constitue une réelle opportunité pour le développement de nouveaux services car elle n'est plus seulement prescriptive mais est fondée sur la maîtrise des risques en opération.

Faut-il encore y répondre en proposant des opérations sécurisées et des engins parfaitement adaptés qui ne sont pas simplement issus du monde du modélisme ou de celui des aéronefs pilotés.

L'objet de cette communication est de montrer comment sécuriser les drones légers et leurs opérations, de manière efficiente, en illustrant le propos par l'exemple d'un drone innovant de très grande élévation à Décollage Court et Atterrissage Vertical (ADAC/V), qui a été développé par la société Cab Innovation (Cabiota ®).

### II. CONTEXTE RÉGLEMENTAIRE

#### A. La réglementation EASA

Applicable depuis le 01/01/2021, la réglementation européenne des drones, émanant de l'EASA (*European Union Aviation Safety Agency*), vise principalement à prévenir deux types de risques :

- la chute du drone au sol susceptible de heurter des personnes ou des biens,
- le vol incontrôlé pouvant engendrer une collision avec un autre usager de l'espace aérien.

Outre la sécurité des personnes et des biens, les risques liés à la malveillance, la vie privée, la protection de l'environnement, l'utilisation de la radio et le spectre de fréquences RF, doivent être traités conformément aux exigences applicables, par ailleurs.

La réglementation distingue différentes classes de drones :

- C0 : moins de 250 grammes,
- C1 : moins de 900 grammes (identification directe à distance et fonction de géovigilance),
- C2 : moins de 4 kg (identification directe à distance, fonction de géovigilance et mode basse vitesse),
- C3 : moins de 25 kg et de 3 m d'envergure (identification directe à distance et géovigilance),
- C4 : moins de 25 kg et dépourvus de moyen de contrôle automatique,
- C5 : vol à vue directe dans un environnement peuplé (ne concerne pas les voilures fixes),
- C6 : vol avec observateurs de l'espace aérien sur zone contrôlée peu peuplée

Elle distingue trois catégories d'opération :

- ouverte : à faible risque, tolérée sans autorisation d'exploitation ni déclaration d'exploitation,
- spécifique : à risque intermédiaire, soumise à une autorisation d'exploitation et à une déclaration de l'exploitant,
- certifiée : à haut risque, astreinte à une certification du drone et de l'exploitant.

Pour la catégorie spécifique, la réglementation préconise l'emploi de la méthode SORA (*Specific Operation Risk Assessment*) qui a été développée par le groupe JARUS (*Joint Authorities for Rulemaking on Unmanned Systems*).

Décrite dans le document de référence [1], cette méthode permet de sécuriser les opérations de drones de cette catégorie et d'obtenir leur agrément par les autorités de l'aviation civile.

Applicable à des drones de moins de 25 kg, cette catégorie d'opération spécifique permet déjà de répondre à beaucoup des nouveaux services attendus pour leur intérêt sociétal ou environnemental. Elle impose toutefois la présence d'un télépilote à distance et n'autorise pas les applications totalement autonomes.

#### B. La méthode SORA

Le concept d'opération envisagée est d'abord évalué afin de lui attribuer une classe de risque au sol (GRC : *Ground Risk Class*) et une classe de risque aérien (ARC : *Air Risk Class*).

Le GRC et l'ARC permettent de déterminer un niveau SAIL (*Specific Assurance and Integrity Level*) d'assurance spécifique et d'intégrité conduisant à des objectifs à atteindre et des moyens à mettre en œuvre pour rendre les risques acceptables. Six niveaux de SAIL caractérisent ainsi la confiance que l'opération du drone restera sous contrôle dans les limites de l'opération prévue.

La méthode SORA autorise d'utiliser des barrières ou mesures d'atténuation pour réduire les deux classes de risque et ainsi réduire le niveau de SAIL.

Elle se fonde sur un processus en 10 étapes.

- Étape 1 : Description des concepts d'opération (ConOps),
- Étape 2 : Détermination de la classe intrinsèque de risque au sol (GRC).

Cette classe de risque au sol dépend de la dimension maximale de l'UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*), de l'énergie cinétique en cas de crash au sol et du type de scénario opérationnel envisagé : vol à vue (VLOS : *Visual Line Of Sight*) ou en dehors du champ de vision (BVLOS : *Beyond Visual Line of Sight*) au-dessus de surfaces au sol comprenant un plus ou moins grand nombre de personnes.

- Étape 3 : Détermination finale du GRC après application de mesures d'atténuation,
- Étape 4 : Détermination de la classe initiale de risque aérien (ARC).

Cette classe de risque en vol dépend de l'altitude de vol, du type d'environnement (rural ou urbain, à proximité d'un aéroport ou héliport) et de caractéristiques particulières de l'espace aérien (contrôlé, atypique, zone nécessitant l'emport d'un transpondeur).

- Étape 5 : Détermination de l'ARC final,
- Étape 6 : Mesures d'atténuation tactique et niveaux de robustesse,
- Étape 7 : Détermination du niveau SAIL d'assurance spécifique et d'intégrité,
- Étape 8 : Identification des objectifs de sécurité opérationnelle (OSOs),
- Étape 9 : Considérations sur les zones adjacentes au sol et de l'espace aérien.

Cette étape concerne le risque de perte de contrôle entraînant une violation des zones adjacentes

- Étape 10 : Etablissement du portefeuille complet de sécurité.

Cette méthode est appliquée, dans cet article, sur un cas d'application.

### III. SÉCURISATION DES DRONES LÉGERS

L'absence de personne à bord, la limitation en poids et la possibilité d'interrompre la mission à tout moment permettent de sécuriser et de fiabiliser les opérations de drones légers beaucoup plus simplement que celles réalisées par des aéronefs pilotés.

Un tel drone comprend, en effet, beaucoup moins de systèmes critiques qu'un aéronef de transport de passagers dont une centaine environ peut engendrer un accident catastrophique (pour laquelle la probabilité d'occurrence spécifiée est inférieure à  $10^{-7}$ /heure). De plus, ces systèmes sont intrinsèquement plus fiables car ils sont très intégrés et comprennent moins de composants susceptibles de défaillir.

La mission du drone peut être interrompue à tout moment par un atterrissage d'urgence sans nécessité d'infrastructure particulière ou de terrain dégagé. Le crash n'est pas considéré critique tant qu'il n'occasionne pas de dommage autre que la destruction de l'aéronef.

La réglementation européenne ne porte que sur deux risques bien identifiés, les dommages aux personnes et aux biens en cas de chute au sol et la collision avec d'autres usagers de l'espace aérien.

Une très large palette de solutions existe pour les maîtriser, alliant des moyens et procédures particulières, l'embarquement de quelques redondances qui se révèlent

impératives et de l'intelligence artificielle pour suivre la bonne santé des matériels (*Health Monitoring*) et assurer leur maintenance prévisionnelle (prédictive).

Les drones sont, en effet, soumis à des dégradations et des limites de fonctionnement, dont notamment :

- l'usure du système propulsif,
- l'usure des gouvernes et de leur motorisation,
- la dégradation de la capacité des batteries d'accumulateurs électriques en fonction du nombre de cycles de charge et décharge,
- la quantité d'énergie résiduelle stockée à bord.

Ce suivi permanent de l'état de bonne santé n'améliore pas seulement la sécurité et la disponibilité opérationnelle des aéronefs, tout en réduisant les coûts de possession, mais ils les modifient en profondeur par des simplifications multiples, tant au niveau du système que des équipements.

Ainsi, les redondances systématiques des équipements soumis à usure (*wear out*) ne s'avèrent plus vraiment nécessaires quand la probabilité d'occurrence des défaillances est très fortement diminuée par l'observation précoce des dégradations. Celle-ci peut même être rendue voisine de zéro en ne tolérant, pour des opérations critiques, que des seuils de niveau de dégradation très bas. En revanche, la probabilité d'occurrence des pannes aléatoires (*random failure*) ne peut pas être diminuée par un quelconque suivi (puisque ces défaillances se caractérisent par l'absence de signe avant-coureur), sauf par la détection d'éventuelles pannes préalablement cachées.

La fiabilité des drones s'améliore ainsi fortement par la détection précoce de l'usure du système propulsif, de la dégradation des gouvernes et de leur motorisation, de la perte de capacité de stockage des batteries d'accumulateurs électriques et de la quantité d'énergie résiduelle à bord.

La défaillance d'un propulseur est particulièrement critique, notamment dans le cas des drones multiroteurs. Les moteurs électriques sont généralement sans balais (*brushless*), afin de supprimer cet élément fragile, et leur commande est de type FOC (*Field Oriented Control*), qui diminue la consommation d'énergie mais nécessite l'emploi de capteurs de position eux-mêmes susceptibles de tomber en panne. Ces capteurs peuvent être éliminés par une commande dite "*sensorless*" qui consiste à analyser la réponse d'un moteur dont les caractéristiques sont connues (résistance, impédance...).

De même que les techniques classiques de fabrication aéronautique se révèlent inappropriées pour assurer de bonnes performances aux aéronefs sans pilote, la multiplication des redondances alourdit inutilement les architectures, consomme de l'énergie et diminue la disponibilité opérationnelle en augmentant d'autant les risques de défaillance. En effet, l'ajout de matériel embarqué pour améliorer la sécurité en vol (redondance ou surveillance) crée de nouvelles possibilités de défaillance qui diminuent, par là-même, la disponibilité opérationnelle. Celle-ci doit être alors rehaussée en augmentant les niveaux de redondance (vote 2/3, double redondance « *fault-stop* » 1 parmi 2, etc.).

Outre le suivi en ligne de l'aéronef, la durée et le coût des essais de fabrication et de maintenance sont grandement

diminués quand les observables de dégradation existent, sans nécessité de démontage et de matériels de test spécifiques.

Ces observables ne requièrent pas d'embarquer autant de capteurs additionnels, ce qui complexifierait inutilement les architectures, mais surtout d'exploiter l'information déjà disponible.

Enfin, la sécurité d'un système est globale et ne repose pas particulièrement sur les algorithmes de surveillance qui n'en constituent que des maillons.

L'embarquement de plusieurs chaînes indépendantes de contrôle de l'aéronef s'avère impératif pour qu'une seule défaillance ne puisse engendrer un accident (point de panne unique). Mais l'architecture peut être simplifiée, à l'extrême, avec l'implantation d'une unique chaîne de secours capable de commander un atterrissage d'urgence en cas de détection d'anomalie. Une défaillance éventuelle de cette chaîne peut engendrer un atterrissage d'urgence intempestif, qui n'est pas considéré comme un événement critique même s'il ne doit pas se produire trop souvent.

#### IV. EXEMPLE D'APPLICATION

Illustré par la figure 1, Cabiota ® est un drone léger de type avion de classe C2 (4 kg) ou C3 en version XL (25 kg) de la réglementation.

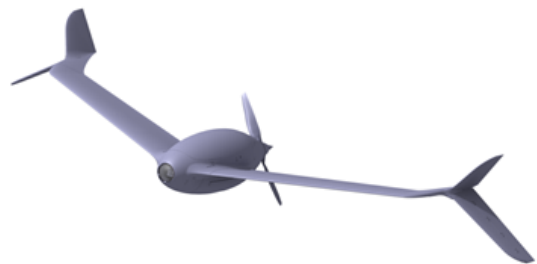


Fig. 1. Drone Cabiota ®

Ce concept original de drone est le fruit d'une activité de Recherche et Développement, menée par la société Cab Innovation, pour lui donner la capacité d'assurer des missions diversifiées avec la plus grande élongation possible.

Cette R&D portait sur les trois axes suivants :

- configuration aérodynamique performante résultant d'une optimisation hybride multidisciplinaire,
- méthodes de fabrication adaptées aux drones légers,
- suivi de bonne santé (*Health Monitoring*) pour améliorer la sécurité et la fiabilité des drones

Recouvrant différents métiers, l'optimisation multidisciplinaire est déjà employée en aéronautique pour améliorer une bonne solution aérodynamique et structurelle (forme d'aile) au moyen de l'algorithme du gradient calculé par la méthode adjointe. Mais seule une méthode hybride, associant la recherche globale et locale, est susceptible de trouver des solutions radicalement nouvelles au-delà du voisinage des solutions connues.

L'exigence de versatilité des missions favorise la configuration propulsive, qui dégage le nez de l'appareil pour embarquer d'éventuels capteurs, et impose une large soute pour accueillir différents types de charge utile et les batteries d'accumulateurs.

Inspirées des oiseaux marins, une configuration en « ailes en mouette » a été imaginée et retenue initialement car elle réduit la traînée induite par rapport à une aile de même envergure et améliore la symétrie du vol en virage par une meilleure stabilité directionnelle.

L'optimisation portait alors sur les ailes et le système propulsif. Le temps de vol et la distance franchissable, au cours d'une mission type effectuée à 150 m d'altitude, constituaient les critères d'optimisation. La masse à vide plus celle allouée aux batteries ne devaient pas dépasser la limite de la classe correspondante de la réglementation. La vitesse de décrochage constituait également une contrainte par l'obligation de décoller avec une marge minimale de 10%.

Les résultats de l'optimisation furent assez différents de ceux dont s'attendaient les concepteurs avec une vitesse de croisière relativement élevée (de l'ordre de 30 m/s) et une sur-motorisation permettant de réduire le temps de montée sans trop impacter le devis de masse.

Cependant, une augmentation de la vitesse de décrochage impose un système de lancement et d'atterrissage adapté. C'est la raison pour laquelle un système de lancement hydro-pneumatique (basé sur le principe de la fusée à eau) a été imaginé ainsi qu'un parachute à haute performance pour l'atterrissage.



Fig. 2. Décollage et atterrissage du drone Cabiota ®

Illustré par la figure 2, cet aéronef à décollage court et atterrissage vertical (ADAC/V), de 1,8 m d'envergure dans sa version à 4 kg, peut transporter une charge utile de 0,5 à 2,5 kg sur une distance de 150 à 650 km pendant 2 à 7 heures.

Il utilise également son parachute en secours pour interrompre la mission.

Cette communauté de moyen, utilisée en fonctionnement nominal et en secours, participe à l'amélioration de la fiabilité et de la sécurité, de même que la réduction à deux du nombre de gouvernes aérodynamiques utilisées pour le contrôle du vol.

La fabrication des drones légers requiert des méthodes spécifiques très éloignées de celles du modélisme ou de la construction des aéronefs pilotés.

Celles-ci doivent permettre de :

- réaliser des formes aérodynamiques complexes en assurant une très bonne qualité de surface,
- supporter l'ensemble des contraintes mécaniques en opération,
- minimiser le poids à vide de l'aéronef.

L'activité de R&D correspondante a porté sur tous les constituants de l'aéronef et plus particulièrement sur le fuselage dont l'ossature est réalisée par impression 3D puis imprégnée, sous vide, avec de la fibre de verre ou de carbone. Celui-ci est représenté à la figure 3 avec son mécanisme d'ajustement de la position du CG par déplacement des batteries d'accumulateurs (1 à 4 packs).



Fig. 3. Fuselage du drone Cabiota ®

L'activité de R&D menée sur le suivi de bonne santé (*Health Monitoring*) s'est notamment intéressée au vieillissement du système propulsif.

La commande du moteur électrique sans balais (*brushless*) est de type FOC (*Field Oriented Control*) sans capteur (*sensorless*).

Une méthode originale de contrôle adaptatif [2] a été développée pour conserver les orientations respectives des champs magnétiques du rotor et du stator, en dépit des variations des différents paramètres du moteur dont l'estimation régulière constitue un observable de dégradation.

L'état du système propulsif (hélice, roulement à bille, enroulement) peut-être alors surveillé en opération pour commander un atterrissage d'urgence ou programmer une action de maintenance.

L'analyse périodique des paramètres enregistrés permet d'estimer la durée de vie résiduelle (RUL & MRL) par l'ajustement d'un modèle de dégradation fondé sur un processus de Lévy (Gamma, Wiener ou Variance-Gamma) non stationnaire accéléré pour tenir compte des conditions d'utilisation et d'environnement (vitesse du moteur et température).

Ce même type de modèle de dégradation est utilisé pour traiter le vieillissement des batteries d'accumulateurs électriques, dont la capacité se dégrade en fonction du nombre de cycles de charge et décharge, et qui est accéléré par la température et la profondeur de décharge.

## V. APPLICATION DE LA METHODE SORA

La méthode SORA a été appliquée pour sécuriser des opérations du drone Cabiota ® et obtenir leur agrément par les autorités de l'aviation civile.

### A. Concept d'opérations

Le concept d'opérations concerne l'imagerie aérienne ou le transport de matériel. Il exclut le transport de marchandises dangereuses sauf si leur emballage est antichoc (ex. poche de sang).

Il couvre les scénarios de pilotage à distance suivants :

- VLOS (vol à vue) ou BVLOS (vol en dehors du champ de vision) sur une zone au sol contrôlée,
- VLOS ou BVLOS dans un environnement peu peuplé,
- VLOS dans un environnement peuplé.

### B. Zones survolées

Les zones survolées recouvrent :

- aire au sol contrôlée en VLOS / BVLOS,
- environnement peu peuplé en VLOS / BVLOS,
- environnement peuplé en VLOS.

En BVLOS et en VLOS en milieu peuplé, le télépilote assure une atténuation visuelle des risques aériens et terrestres grâce aux images transmises par une caméra frontale embarquée.

### C. Limitations du drone

Ces limitations concernent :

- la dimension caractéristique maximale est inférieure à 3 m (envergure = 1,75 m),
- la masse maximale en charge est de 4 kg,
- la vitesse maximale en croisière est de 45 ms (162 km/h),
- l'énergie cinétique typique est inférieure à 34 kJ ( $E = \frac{1}{2} MV^2 = 4 \text{ KJ}$ ).

### D. Limite de hauteur de vol

La hauteur maximale du volume opérationnel ne doit pas être supérieure à 120 m (400 ft) au-dessus de la surface survolée (ou de toute autre référence d'altitude définie par les autorités).

### E. Espace aérien

Le vol est autorisé :

- dans l'espace aérien non contrôlé, au-dessus de zones rurales ou urbaines,
- en espace aérien contrôlé,
- en zone de mode-C Veil ou TMZ si un transpondeur est intégré dans la charge utile,
- en zone ségréguée établie par les États membres conformément à l'article 15.

### F. Visibilité

Le drone est exploité en VLOS dans une zone où la visibilité minimale en vol est supérieure à 3 km. Cette visibilité en vol s'entend comme la distance à laquelle un aéronef peut être détecté visuellement par l'équipage distant.

Le drone est exploité en BVLOS dans une zone où la visibilité minimale en vol est supérieure à 3 km. Cette visibilité en vol s'entend comme la distance à laquelle un aéronef peut être détecté visuellement par la caméra embarquée. Elle correspond à la distance que peut parcourir le drone pendant une minute à pleine vitesse.

### G. Détermination du GRC Initial

La valeur du GRC initial est donné par la table représentée à figure 4.

Cette valeur peut diminuer par des mesures d'atténuation du risque conformément à la table de la figure 5.

Cependant, la valeur du GRC final ne doit pas être supérieure à 7.

Dimension maximale UAV :	1 m / env. 3ft	3 m / env. 10ft	8 m / env. 25ft	> 8 m / env. 25ft
Énergie cinétique typique :	< 700 J (environ 529 ft lb)	< 34 kJ (environ 25 000 ft lb)	< 1 084 J (environ 800 000 ft lb)	> 1 084 J (environ 800 000 ft lb)
Scénarios opérationnels :				
VLOS / BVLOS sur une surface au sol contrôlée	1	2	3	4
VLOS dans un environnement peu peuplé	2	3	4	5
BVLOS sur une population clairsemée	3	4	5	6
VLOS dans un environnement peuplé	4	5	6	8
BVLOS dans un environnement peuplé	TBD*	TBD*	TBD*	TBD*
VLOS sur un rassemblement de personnes	7	*TBD dans une future édition de la méthode SORA		
BVLOS sur un rassemblement de personnes	TBD*			

Fig. 4. Table de détermination du GRC initial

Séquence	Atténuation du risque au sol	Robustesse		
		Faible / Aucun	Moyen	Haute
1	M1 - Atténuation stratégique diminuant le risque de collision avec des personnes	0 : aucun -1 : faible	-2	-4
2	M2 - Les effets de l'impact au sol sont réduits	0	-1	-2
3	M3 - Un plan d'intervention d'urgence (ERP) est en place, l'opérateur de l'UAS est validé et efficace	1	0	-1

Fig. 5. Table de détermination du GRC

### H. Détermination du GRC final après atténuation

Trois mesures d'atténuation stratégique (M1) ont été envisagées :

- surveillance et évitement d'éventuels groupes de personnes par le télépilote au moyen des images transmises par une caméra frontale embarquée,
- activation automatique d'une alarme sonore en cas d'atterrissage d'urgence permettant à toute personne au sol de s'éloigner du point de chute (> 100 décibels à 15 cm),
- un radar de suivi et d'évitement de terrain est actuellement à l'étude (dépôt d'un brevet en cours).

Ces mesures sont de faible robustesse car elles ne font l'objet que d'une simple déclaration par le demandeur.

Trois mesures d'atténuation du risque par réduction de l'impact au sol (M2) ont été envisagées :

- conception limitant la gravité des accidents (aile cassante et bord d'attaque en mousse),
- ouverture automatique du parachute en cas d'atterrissage d'urgence déclenché par le télépilote ou les surveillances embarquées,
- commande d'atterrissage d'urgence vérifiée par le télépilote lors de la procédure d'essai pré-vol.

Ces mesures sont de robustesse moyenne car elles sont décrites dans le Plan de Sécurité.

Il n'a pas été envisagé d'atténuer le risque par un plan d'intervention d'urgence (M3) pour les opérations.

A l'issue de ces différentes mesures, le GRC final est indiqué dans la table de la figure 6, selon les différents types de scénario.

Operational scenarios	Intrinsic GRC	M1 - Strategic mitigations	M2 - ground impact reduced	Final GRC
VLOS/BVLOS over a controlled ground area	2			2
VLOS in a sparsely populated environment	3		-1 Medium robustness	2
BVLOS in a sparsely populated environment	4		-1 Medium robustness	3
VLOS in a populated environment	5	-1 Low robustness	-1 Medium robustness	3

Fig. 6. GRC final

### I. Détermination de l'ARC

Donné par le graphe de la figure 7, la classe supérieure de risque aérien est ARC-c sans réelle possibilité d'appliquer des mesures d'atténuation.

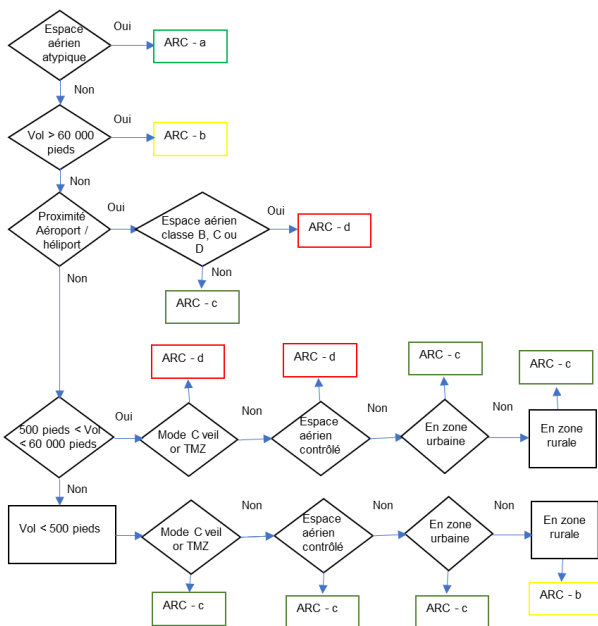


Fig. 7. Graphe de détermination de l'ARC initial

### J. Mesures d'atténuation tactique et niveaux de robustesse

Le vol à vue (VLOS) est considéré comme une atténuation tactique acceptable du risque de collision pour tous les niveaux d'ARC.

En vol en dehors du champ de vision (BVLOS, le tableau de la figure 8 détermine le niveau de TMPR et de robustesse.

ARC résiduel	TMPR	Niveau de robustesse
ARC-d	Haut	Haut
ARC-c	Moyen	Moyen
ARC-b	Bas	Bas
ARC-a	Non requis	Non requis

Fig. 8. Niveau de TMPR et de robustesse

Selon le type d'opération, des mesures d'atténuation peuvent être assurées par :

- l'usage de la caméra en vol,
- un transpondeur passif adapté à la zone de vol (ADS-B /FLARM),
- un système de détection et d'évitement DAA (*Detect and Avoid*),
- une procédure particulière en dehors du champ de vision.

### K. Détermination du SAIL

La détermination du SAIL (*Specific Assurance and Integrity Level*) est donnée par la table de la figure 9.

GRC final	ARC résiduel			
	a	b	c	d
≤ 2	I	II	IV	VI
3	II	II	IV	VI
4	III	III	IV	VI
5	IV	IV	IV	VI
6	V	V	V	VI
7	VI	VI	VI	VI
> 7	Operations certifiées			

Fig. 9. Table de détermination du SAIL

Le concept d'opérations et les mesures d'atténuations envisagées conduisent à un niveau de SAIL IV.

### L. Objectifs de sécurité opérationnelle

Le niveau de SAIL détermine les objectifs de sécurité opérationnelle (OSOs) indiqués dans les tables des figures 10 à 13.

Ceux-ci-ci peuvent être :

- facultatif (O),
- recommandé avec une faible robustesse (L),
- recommandé avec une robustesse moyenne (M),
- recommandé avec une robustesse élevée (H).

		SAIL					
OS	O	I	II	III	IV	V	VI
	<b>Problème technique avec l'UAS</b>						
1	S'assurer que l'opérateur de l'UAS est compétent et / ou éprouvé	O	L	M	H	H	H
2	S'assurer que le fabricant de l'UAS est compétent et / ou éprouvé	O	O	L	M	H	H
3	L'UAS est maintenu par une entité compétente et / ou éprouvée	L	L	M	M	H	H
4	L'UAS est développé selon les normes de conception reconnues	O	O	O	L	M	H
5	L'UAS est conçu en tenant compte de la sécurité et de la fiabilité du système	O	O	L	M	H	H
6	Les performances de la liaison C3 (Command, Control and Communication) sont appropriées pour l'opération	O	L	L	M	H	H
7	L'inspection des UAS (inspection des produits) pour assurer la cohérence avec les ConOps	L	L	M	M	H	H
8	Procédures opérationnelles définies, validées et respectées	L	M	H	H	H	H
9	Autopilote formé et à jour et capable de contrôler la situation anormale	L	L	M	M	H	H
10	Récupération sûre d'un problème technique	L	L	M	M	H	H

Fig. 10. Objectifs de sécurité opérationnelle (Table 1)

		SAIL					
OS	O	I	II	III	IV	V	VI
	<b>Détérioration des systèmes externes prenant en charge les opérations UAS</b>						
11	Des procédures sont en place pour gérer la détérioration des systèmes externes prenant en charge les opérations UAS	L	M	H	H	H	H
12	L'UAS est conçu pour gérer la détérioration des systèmes externes supportant les opérations UAS	L	L	M	M	H	H
13	Les services externes soutenant les opérations UAS sont adéquats pour l'opération	L	L	M	H	H	H

Fig. 11. Objectifs de sécurité opérationnelle (Table 2)

		SAIL					
OS	O	I	II	III	IV	V	VI
	<b>Erreur humaine</b>						
14	Les procédures opérationnelles sont définies, validées et respectées	L	M	H	H	H	H
15	Équipage à distance formé et à jour et capable de contrôler la situation anormale	L	L	M	M	H	H
16	Coordination multi-équipage	L	L	M	M	H	H
17	L'équipage à distance est apte à fonctionner	L	L	M	M	H	H
18	Protection automatique de l'enveloppe de vol contre les erreurs humaines	O	O	L	M	H	H
19	Récupération sûre après une erreur humaine	O	O	L	M	M	H
20	Une évaluation des facteurs humains a été effectuée et l'interface homme-machine (IHM) a été jugée appropriée pour la mission	O	L	L	M	M	H

Fig. 12. Objectifs de sécurité opérationnelle (Table 3)

		SAIL					
OS	O	I	II	III	IV	V	VI
	<b>Conditions de fonctionnement défavorables</b>						
21	Les procédures opérationnelles sont définies, validées et respectées	L	M	H	H	H	H
22	L'équipage distant est formé pour identifier les conditions environnementales critiques et les éviter	L	L	M	M	M	H
23	Les conditions environnementales pour des opérations sûres sont définies, mesurables et respectées	L	L	M	M	H	H
24	L'UAS est conçu et qualifié pour des conditions environnementales défavorables	O	O	M	H	H	H

Fig. 13. Objectifs de sécurité opérationnelle (Table 4)

### M. Considérations sur les zones adjacentes au sol et de l'espace aérien

Aucune panne probable du drone ou des systèmes externes ne conduit à une opération en dehors du volume opérationnel.

Le respect de cette exigence est justifié par :

- la stricte indépendance de la commande à distance d'arrêt d'urgence de la mission et d'atterrissage sous parachute qui s'effectue par une carte de sécurité indépendante de la carte de contrôle du drone,
- l'activation d'une commande similaire par la carte de contrôle du drone en cas de défaillance auto-détectée (chien de garde),
- la prise en compte de tout risque particulier pertinent (par exemple, grêle, verglas, neige, perturbations électromagnétiques, etc.) dans la procédure de préparation du vol.

Ainsi, aucune défaillance unique du drone ou des systèmes externes supportant l'opération ne l'amène à fonctionner en dehors du tampon de risque sol, et la probabilité de sortir du volume opérationnel est inférieure à  $10^{-4}/FH$ .

De plus, les logiciels (SW) et le matériel électronique embarqué (AEH), dont les erreurs de développement pourraient conduire à des opérations en dehors de la zone tampon de risque sol, ont été développés selon une norme ou une méthodologie industrielle reconnue comme étant adéquate par l'autorité compétente.

## VI. CONCLUSION

Un drone n'est ni un jouet, ni un aéronef ordinaire et sa fiabilisation lui est propre. En se trompant d'objet, l'essor des opérations de drone de moins de 25 Kg, pourrait (et a déjà pris) du retard, dans notre pays.

Le suivi de bonne santé (*Health monitoring*) et la maintenance prévisionnelle (prédictive) ne concerne pas seulement des systèmes complexes et peut paradoxalement simplifier certains d'entre eux dont notamment les drones.

La méthode SORA offre une réelle opportunité pour développer de nouveaux usages de drones dans la catégorie spécifique et obtenir leur agrément par les autorités de l'aviation civile.

Les opérations de drones peuvent être autant, voire plus, fiabilisées et sécurisées que celles des avions et hélicoptères, au moyen d'engins fiables et dotés d'un mode de secours robuste (arrêt d'urgence).

L'activité de R&D de la société Cab Innovation se poursuit sur les sujets suivants :

- consolidation des mesures de vitesse et d'attitude au moyen d'observateurs statistiques,
- conception d'un radar de suivi et d'évitement de terrain à faible coût,
- embarquement d'un système anticollision,
- mise en œuvre du suivi en ligne de l'état de dégradation des matériels,
- élargissement du champ d'opération en conformité avec les exigences de la réglementation.

#### REFERENCES

[1] Acceptable Means of Compliance (AMC) and Guidance Material (GM) to Commission Implementing Regulation (EU) 2019-947 - Issue 1.

[2] Cabarbaye Aurélien & André, *Mise en œuvre des HUMS sur les systèmes embarqués – Application aux drones*, Lamda mu 21, 2018.

#### BIBLIOGRAPHIE

A, A & A Cabarbaye, *Conception optimale déterministe et probabiliste*, Cab Innovation Editeur, 2022, ISBN : 979-10-97287-14-6

A, A & A Cabarbaye, *Mise en œuvre des essais accélérés et de la maintenance prédictive*, Cab Innovation Editeur, 2021, ISBN : 979-10-97287-13-9

A, A & A Cabarbaye, *La fiabilité aujourd'hui*, Cab Innovation Editeur, 2021, ISBN : 979-10-97287-12-2