



Safety-maximizing human-machine interactions in drone mission preparation : the case of the specific category

Balita Heriniaina Rakotonarivo

► To cite this version:

Balita Heriniaina Rakotonarivo. Safety-maximizing human-machine interactions in drone mission preparation : the case of the specific category. Computer Science [cs]. ISAE, 2022. English. NNT : 2022ESAE0055 . tel-04049359

HAL Id: tel-04049359

<https://enac.hal.science/tel-04049359>

Submitted on 28 Mar 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



THÈSE

En vue de l'obtention du

DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

Délivré par :

Institut Supérieur de l'Aéronautique et de l'Espace

Présentée et soutenue par :
Balita Heriniaina RAKOTONARIVO

le mercredi 14 décembre 2022

Titre :

Interactions humain-machine maximisant la sécurité lors de la
préparation des missions de drones : cas de la catégorie
d'exploitation spécifique

 cole doctorale et discipline ou spécialité :

EDSYS : Informatique

Unité de recherche :

ENAC-LAB - Laboratoire de Recherche ENAC

Directeur(s) de Thèse :

M. Stéphane CONVERSY (directeur de thèse)

M. Nicolas DROUGARD (co-directeur de thèse)

Jury :

Mme Valérie BUDINGER Professeure ISAE-SUPAERO - Présidente

M. Stéphane CONVERSY Professeur ENAC - Directeur de thèse

M. Nicolas DROUGARD Enseignant-Chercheur ISAE-SUPAERO - Co-directeur de thèse

M. Thierry DUVAL Professeur IMT Atlantique - Rapporteur

M. Olivier GRISVARD Senior Expert Thalès DMS France - Examineur

M. Emmanuel PIETRIGA Directeur de recherche INRIA SACLAY - Rapporteur

Remerciements

Ce manuscrit, les connaissances et les artefacts produits durant cette thèse sont le fruit d'un travail d'équipe. Je tiens à remercier Jérémie Garcia, mon encadrant de thèse ; Stéphane Conversy et Nicolas Drougard, mes directeurs de thèse ainsi que Caroline Chanel. Grâce à vous quatre, un rêve, qui semblait voué à ne jamais pouvoir se réaliser pour une kyrielle de raisons, a pu se concrétiser. Merci pour l'opportunité et la confiance ! *Top !*

À mes adorables et adorées filles (Tendriniavo et Todisoa) et ma tendre épouse (Andoniaina), je vous remercie de m'avoir toujours soutenu. Merci d'avoir accepté les moments où je n'ai pas pu être aussi présent que je ne l'aurais voulu, ainsi que de m'avoir rendu la tâche plus facile en comprenant que Papa reprenait ses études, avec tout ce que cela impliquait. *The future is bright !*

À Dada - mon père, deux fois ingénieur diplômé, mon modèle ; à Neny - ma mère, mon phare, soutien indéfectible par tous les temps ; à Onja - qui a su trouver les bons arguments pour me motiver à reprendre et à achever les études ; et à Andonirina - première Docteur de la famille, connaissant bien les arguments pour aller de l'avant lors des moments moins faciles d'une thèse et source d'inspiration pour la mienne. Merci encore les amis, je suis heureux et chanceux de faire partie de la famille. *MDF for life !*

Un grand merci à Catherine Ronflé-Nadaud, Philippe Rapp, Philippe Notry et Anne Christine Escher. Grâce à vous, le Mastère Spécialisé "Air Navigation Systems Engineering and Operations" a été un succès. Servant de tremplin pour entrer dans le domaine des drones, il a permis de connecter les points entre mon expérience de météorologiste aéronautique et d'informaticien avec les compétences en navigation aérienne. Cette synergie a permis de poursuivre sur ce travail de thèse en informatique et appliqué aux opérations de drones.

Mes chaleureux remerciements aux membres du jury, Valérie Budinger - Présidente ; Thierry Duval et Emmanuel Pietriga - Rapporteurs ; ainsi qu'Olivier Grisvard - Examineur. De même, je remercie les membres récurrents de mon comité de suivi : Olivier Grisvard et Magali Barbier. Votre rigueur, vos conseils et encouragements ont été précieux.

Aux opérateurs de drones en catégorie d'exploitation spécifique ; aux équipes de la Direction de la Sécurité de l'Aviation Civile (DSAC) ; aux membres de l'équipe Informatique Interactive (E2I) : stagiaires, doctorants et permanents ; au personnel administratif de l'École Doctorale Systèmes (EDSYS), de l'École Nationale de l'Aviation Civile (ENAC) et de l'Institut Supérieur de l'Aéronautique et de l'Espace (ISAE) ; ainsi qu'à toutes les autres personnes et entités qui ont fait que cette thèse ait pu démarrer et qu'elle puisse aboutir, je vous suis reconnaissant. *Merci beaucoup ! Misaotra indrindra !*

Résumé

Les drones apportent d'importants bienfaits à l'humanité, par exemple en tant que soutiens agiles et efficaces lors de la gestion des situations d'urgence ou de catastrophes naturelles, en permettant des livraisons de matériel médical plus rapides dans les endroits enclavés, ou l'acquisition accélérée de grandes quantités de données utiles pour la science et l'économie. Les aéronefs sans pilote à bord sont plus faciles à déployer, moins chers à construire, à exploiter et à entretenir que ceux de l'aviation conventionnelle. Parmi toutes les applications des drones, celles qui produiront un impact positif important sur la société se feront principalement hors vue du pilote à distance. Cependant, ce mode d'exploitation augmente le niveau de risque associé aux opérations. Avant de pouvoir réaliser les opérations, des études de sécurité devront être réalisées par les exploitants. Puis, ils devront demander une autorisation d'exploitation à une autorité compétente, qui vérifiera et validera le niveau de sécurité envisagé. Ces études de risque sont chronophages et reposent sur une méthodologie complexe appelée Specific Operation Risk Assessment. De plus, il est prévu une augmentation importante du nombre de missions de ce type dans les années à venir, en même temps que le nombre d'exploitations de drones devrait augmenter.

Comment alors rendre plus utilisable la réalisation des études de sécurité et la demande d'autorisation d'exploitation des missions de drones, tout en maximisant la sécurité ?

Grâce à une revue systématique de la littérature, nous compilons les contributions existantes en matière d'Interactions Humain-Machine. Nous classifions les interactions selon les tâches effectuées, la phase de vol et l'utilisation des représentations cartographiques. Puis les recommandations de conception sont synthétisées. Toutefois, ces interactions sont le plus souvent appliquées pendant la phase d'exécution, et beaucoup moins la phase de préparation qui représente la majeure partie du temps d'une mission et durant laquelle les tâches d'analyse de sécurité et de demande d'autorisation sont réalisées. L'usage des cartes pour représenter l'opération est aussi largement étudié durant la phase d'exécution mais peu durant l'analyse de sécurité. Peu de données de terrain sur le travail réel des opérateurs opérant dans la catégorie d'exploitation spécifique sont disponibles.

Nous modélisons donc le processus de demande d'autorisation d'exploitation en catégorie spécifique et produisons des recommandations de design, suite à des entretiens et un questionnaire soumis aux exploitants de drones et aux

régulateurs. Ces recommandations se positionnent par rapport à trois axes à soutenir : l'automatisation, l'augmentation et la collaboration.

Enfin, certaines recommandations sont mises en œuvre sur un cas d'utilisation précis dans lequel un opérateur devait réaliser une étude de sécurité et demander une autorisation d'exploitation sur un aéroport contrôlé. Nous aboutissons alors à une carte interactive et de nouvelles interactions que nous qualifions d'"orientées sécurité", permettant une description plus effective du concept d'opérations et des évaluations de risques basées l'analyse géo-visuelle des opérations des drones, afin de maximiser leur sécurité.

Mots-clés IHM, sécurité des opérations de drones, demande d'autorisation en catégorie d'exploitation spécifique, conception participative, carte interactive, analyse géovisuelle, collecticiel, prise de décision

Abstract

Drones provide important benefits to humanity, for example, as agile and efficient support during emergency management or natural disasters, enabling faster delivery of medical supplies to remote locations, or accelerated acquisition of large amounts of data useful for science and economics. Unmanned aircraft are easier to deploy and cheaper to build, operate and maintain than conventional aviation aircraft. Of all the applications of drones, those that will produce a significant positive impact on society will be primarily out of sight of the remote pilot. However, this mode of operation increases the level of risk associated with operations. Before operations can be carried out, safety studies will have to be carried out by the operators. Then, they will have to request operating authorization from a competent authority, which will verify and validate the level of safety envisaged. These risk studies are time-consuming and rely on a complex methodology called Specific Operation Risk Assessment. Moreover, the number of missions of this type is expected to increase significantly in the coming years, at the same time as the number of drone operations is expected to increase.

How then can we make it more usable to conduct safety studies and apply for authorization to operate drone missions, while maximizing safety ?

Through a systematic review of the literature, we compile existing contributions in Human-Machine Interactions. We classify the interactions according to the tasks performed, the flight phase, and the use of map representations. Design recommendations are synthesized. However, these interactions are most often applied during the execution phase and much less during the preparation phase which represents most of the time of a mission and during which the tasks of safety analysis and authorization request are performed. The use of maps to represent the operation is also widely studied during the execution phase but little during the security analysis. Little field data on the actual work of operators operating in the specific operating category is available.

Therefore, we model the authorization request process for operations in Specific Category and produce design recommendations, following interviews and a questionnaire submitted to drone operators and regulators. These recommendations are positioned in relation to three axes to be supported : automation, augmentation, and collaboration.

Finally, some recommendations are implemented on a specific use case in which an operator had to perform a safety study and apply for operating au-

thorization on a controlled airfield. We then end up with an interactive map and new interactions which we qualify as "safety-oriented", allowing a more effective description of the concept of operations and risks assessments based on the geo-visual analysis of drone operations, to maximize their safety.

Keywords HMI, safety of drone operations, application for authorization in specific operating category, participatory design, interactive map, geovisual analysis, groupware, decision making

Table des matières

Liste des acronymes et des abréviations	13
Table des figures	16
Liste des tableaux	17
1 Introduction	19
1.1 Domaines de recherche	22
1.2 Prise de position	22
1.3 Méthodes mises en oeuvre	23
1.3.1 Revue Systématique de la Littérature	24
1.3.2 Entretiens	25
1.3.3 Groupe de discussion	25
1.3.4 Questionnaire	26
1.3.5 Co-conception	26
1.4 Contributions	27
1.4.1 Contributions empiriques	27
1.4.2 Contributions théoriques	28
1.4.3 Contributions relatives au design	28
1.5 Plan du manuscrit de thèse	29
2 Etat de l'art	31
2.1 Sécurité des opérations de drones	31
2.1.1 Drones ou aéronefs sans pilotes à bord	31
2.1.2 Opérations de drones	33
2.1.3 Sécurité des opérations de drones	34
2.2 Liens entre cartes et sécurité des opérations de drones	40
2.3 Cartes	42
2.3.1 Avantages des cartes	44
2.3.2 Utilisation des cartes	45
2.3.3 Interactions possibles sur une carte	47
2.4 Résumé	47

3	Revue systématique de la littérature	49
3.1	Questions de recherche	50
3.2	Méthodologie	51
3.2.1	Réalisation	51
3.2.2	Analyse	53
3.3	Résultats	54
3.3.1	Cas d'études considérés	54
3.3.2	RQ1 : Quels sont les types de missions qui bénéficient de soutien à la sécurité et celles qui sont peu représentées ? .	57
3.3.3	RQ2 : Quelles sont les approches existantes du soutien à la sécurité des missions de drones ?	58
3.3.4	RQ3 : Quelle est la proportion d'approches s'appuyant sur l'IHM ?	62
3.3.5	RQ4 : Quelles sont les contributions du domaine de l'IHM dans les articles scientifiques traitant du soutien à la sécurité des missions de drones ?	63
3.3.6	RQ5 : Quelle est l'utilisation des cartes parmi ces contributions IHM ?	66
3.3.7	RQ6 : Quelles sont les recommandations de conception issues de ces contributions IHM ?	67
3.3.8	Perspectives identifiées	73
3.4	Discussion	74
3.4.1	Disparités entre les étapes et les tâches utilisateurs	74
3.4.2	Usage de la réalité augmentée et de la réalité virtuelle . .	75
3.4.3	Représentations géographiques pour les analyses de sécurité	76
3.4.4	Limites sur la validité	76
3.5	Résumé	77
4	Processus de demande d'autorisation	79
4.1	Méthode	80
4.1.1	Entretiens	80
4.1.2	Questionnaire	84
4.2	Résultats	85
4.2.1	Types de missions et description des étapes	85
4.2.2	Établir un concept d'opération	87
4.2.3	Évaluer et maîtriser les risques opérationnels	92
4.2.4	Obtenir une autorisation d'exploitation	97
4.2.5	Accord sur les recommandations et évaluation des priorités	100
4.3	Discussion	101
4.3.1	Un meilleur soutien pour une activité complexe	101
4.3.2	Un équilibre à trouver entre sécurité et automatisation . .	102
4.3.3	Un équilibre à trouver entre sécurité et objectifs commerciaux	103
4.3.4	Une activité collaborative	103
4.3.5	Limites sur la validité	104
4.4	Résumé	105

5	Manipulation des paramètres opérationnels	107
5.1	Concept	108
5.1.1	Rendu des paramètres opérationnels sur une carte	108
5.1.2	Fournir un retour d'information sur la sécurité après ajustement des paramètres opérationnels	108
5.1.3	Exemple de scénario : les buffers et le vent	109
5.2	Méthode	110
5.2.1	Étude longitudinale	110
5.2.2	Etude par groupes de discussion	113
5.3	Résultats de l'étude longitudinale	113
5.3.1	Représentation et saisie des paramètres opérationnels	114
5.3.2	Exploration visuelle de la sécurité	116
5.3.3	Exportation et intégration avec d'autres outils et plateformes	118
5.4	Résultats des groupes de discussion	120
5.4.1	Représentation des paramètres opérationnels sur une carte	120
5.4.2	Soutenir l'évaluation de la sécurité	121
5.4.3	Prise de décision et Échange d'informations	122
5.5	SafeCoop Toolkit	123
5.5.1	Module d'importation de données cartographiques	123
5.5.2	Module trajectoires et plans de vol	123
5.5.3	Modules des interactions orientées sécurité	125
5.5.4	Module de cartographie 3D	125
5.5.5	Module import-export	125
5.5.6	Module d'intégration avec Paparazzi	125
5.5.7	Module de gestion de la mission	126
5.6	Discussion	126
5.6.1	Support de la sécurité avec l'analyse géovisuelle	127
5.6.2	De la description du concept d'opérations à l'exécution	128
5.6.3	Limites et perspectives de recherche	128
5.7	Résumé	130
6	Conclusion Et Perspectives	133
6.1	Bilan des contributions	133
6.2	Discussion	136
6.3	Bilan méthodologique	137
6.4	Perspectives	138
	Bibliographie	141
	Annexes	169
A	Liste des publications	170
B	Sécurité Aéronautique	171
B.1	Aéronefs sans pilotes à bord	171
B.2	Opérations de drones	173
B.3	Importance des applications des drones	174

B.4	Gestion de la sécurité aérienne	176
B.5	Sécurité des opérations de drones	180
B.6	La réglementation appliquée aux drones	186
B.7	Les cartes en aéronautique	188
C	Modèle conceptuel complet de la demande d'autorisation en ca- tégorie d'exploitation spécifique	191
D	Questionnaire de suivi	192

Liste des acronymes et des abréviations

AESC Autorisation d'Exploitation en Catégorie Spécifique.

BVLOS Beyond Visual Line Of Sight.

CONOPS Concept of Operation.

DSAC Direction de la Sécurité de l'Aviation Civile.

EASA European Aviation Safety Agency.

EVLOS Extended Visual Line Of Sight.

GCS Ground Control Station.

IHD Interaction Humain-Drones.

IHM Interaction Humain-Machine.

OACI Organisation de l'Aviation Civile Internationale.

PDRA Predefined Risk Assessment.

PO Paramètres Opérationnels.

QQOQCCP Qui, Quoi, Où, Quand, Combien, Comment et Pourquoi.

RSL Revue Systématique de la Littérature.

SAIL Specific Assurance and Integrity Level.

SORA Specific Operation Risk Assessment.

UAS Unmanned Aircraft System.

UTM Unmanned Traffic Management.

VLL Very Low Level.

VLOS Visual Line Of Sight.

Table des figures

1.1	Cheminement de la thèse.	24
2.1	Éléments d'un système de drones	32
2.2	Processus de SORA	38
2.3	Représentation graphique du modèle sémantique de SORA	41
2.4	Capture d'écran de la station de contrôle au sol Paparazzi	42
2.5	Types de volumes d'espace aérien dans U-space	43
2.6	Interfaces d'un système UTM	43
2.7	Continuum de la pensée visuelle à la communication visuelle. . .	46
2.8	Représentation de l'espace d'utilisation d'une carte	46
3.1	Diagramme PRISMA2020 de la RSL	52
3.2	Nombre d'articles par année depuis 2014	54
4.1	Comparaison entre processus prescrit et processus décrit	86
4.2	Mitigation d'un risque au sol	88
4.3	Continuum des paramètres opérationnels	90
4.4	Histogramme du niveau d'accord	100
4.5	Histogramme de la priorisation des recommandations	100
4.6	Scores du niveau d'accord et de priorisation des recommandations	101
5.1	Concept appliquant l'analyse géovisuelle	109
5.2	Chronologie de SafeCoop	110
5.3	Prototype #1	112
5.4	Prototype #9 : SafeCoop	114
5.5	Interaction GOTO	115
5.6	Interaction ORBIT	116
5.7	Cohérence des icônes des acteurs	116
5.8	Interaction Synchronisation des vues 2D et 3D	117
5.9	Modes de pilotage et sécurité	118
5.10	Export vers Paparazzi	119
5.11	Autres interactions orientées sécurité	120
5.12	Architecture de SafeCoop Toolkit	124
1	Éléments d'un système de drones	172

2	Processus de la gestion des risques de sécurité	178
3	Accidents de drones	182
4	Risques pour une opération de drones	183
5	Modèle décrit, dans sa version complète	191
6	Questions sur l'accord avec les recommandations	192
7	Questions sur la priorité entre les recommandations	193

Liste des tableaux

3.1	Bénéficiaires des contributions des articles	55
3.2	Tailles de l'aéronef	56
3.3	Types d'aéronef considéré	57
3.4	Segment du système	58
3.5	Caractéristiques de l'espace aérien	59
3.6	Types d'opérations	60
3.7	Longue élongation	61
3.8	Integration au trafic aérien	62
3.9	Etapas de la mission	63
3.10	Nombre de drones impliqués	64
3.11	Approches principales soutenant la sécurité	65
3.12	Répartition des catégories IHM/FH	66
3.13	Tâches utilisateurs	67
3.14	Représentations spatiales par tâches	68
4.1	Questions posées lors des entretiens	81
4.2	Description des participants aux entretiens	83
1	Classification des drones	173

Chapitre 1

Introduction

"Drones overall will be more impactful than I think people recognize in positive ways to help society".
– Bill Gates

"Government should have drones. Industries, companies can have drones. Everyone else does not need drones. It's just going to create mischief. They are going to be crashing the planes, they're going to be spying on neighbors. People don't need drones".
– Gary B. Smith

Depuis leur utilisation civile au début des années 2010, les drones apportent de nombreux bénéfices à la société, par exemple en tant que support pour la phase de recherche et sauvetage après des catastrophes, pour la livraison de médicaments et de matériel médical pour atteindre des endroits enclavés ou pour être plus efficace et rapide que les transports habituels, etc. Mais l'exploitation de drones peut engendrer des dangers de blessures ou de mort pour les humains au sol, des dommages aux drones et autres avions conventionnels ainsi que les autres biens au sol (comme les véhicules, les maisons, les infrastructures), en plus des impacts néfastes sur l'environnement (nuisances visuelles et sonores) ou la société en elle-même (menaces pour le respect de la vie privée et la sûreté) [66]. En tant qu'activité aéronautique et donc à risque, toute mission doit être autorisée par la loi et vérifiée par le régulateur, même dans le cadre des loisirs.

Selon la réglementation européenne sur les drones [59], plus il y a de risques, plus le nombre de contraintes à respecter pour être autorisé à faire voler un drone augmente. Pour les risques faibles, une simple déclaration est souvent suffisante car les risques auront été gérés par le constructeur et les zones autorisées pour le vol sont supposées être connues ou consultables par le public via une carte disponible en ligne. Pour les risques modérés, avant d'opérer, une autorisation d'exploitation spécifique pour l'opération est délivrée par l'autorité centrale, aussi nommée *régulateur*, à un exploitant, ou *opérateur*, qui en aurait fait la demande. Cela concerne principalement les opérations qui ont lieu dans un environnement avec des personnes aux alentours, ou dont la hauteur de vol

dépasse les 120 mètres, ou qui se font sans que le télépilote ne puisse avoir un contact visuel permanent avec l'aéronef, ou encore dont la masse de ce dernier dépasse les 25 kilogrammes.

L'autorisation d'exploitation en catégorie spécifique (AESC) doit inclure une étude des risques de l'opération envisagée, les caractéristiques du système de drones qui sera déployé, ainsi que le manuel des procédures pour mener les opérations et réagir aux urgences. Elle est scrupuleusement étudiée par le régulateur et donne lieu à de nombreux échanges entre l'opérateur et le régulateur jusqu'à ce que les deux parties soient satisfaites du niveau de sécurité de la future opération. L'AESC doit aussi inclure les différentes autorisations fournies par les responsables des différents lieux à survoler, comme la préfecture pour les vols en milieu urbain, l'office de l'environnement pour les vols au-dessus d'aires protégées, etc.

Le processus d'étude de sécurité et de demande d'autorisation d'exploitation est considéré comme chronophage et complexe. Le régulateur lui-même conseille de ne l'utiliser qu'en dernier recours [83]. Dans les faits, la préparation d'une telle mission nécessite de combiner de nombreux outils, de tenir compte simultanément de plusieurs textes réglementaires, de créer et réunir les documents nécessaires, de choisir le bon équilibre entre sécurité opérationnelle et faisabilité économique puis de fournir les arguments pour justifier ce qui est déclaré. Ces démarches doivent être entamées au moins trois mois avant la date du vol prévu. Ainsi, dans le cadre de ce manuscrit, nous qualifierons une telle mission de mission complexe, par opposition aux missions de drone définies par simple déclaration ou pré-autorisées dans certaines zones réservées.

L'efficacité du processus de demande d'AESC est un enjeu d'autant plus important que le nombre de missions complexes de drone va augmenter [276]. En effet, ces dernières sont considérées comme celles ayant le plus de potentiel d'applications intéressantes par exemple avec la livraison de colis, l'inspection de larges réseaux d'énergie ou de transports, la cartographie ou la surveillance de vastes zones, l'acquisition de données atmosphériques ou la réponse aux situations d'urgence [69]. De plus, des nouveaux concepts d'opérations sont et seront inventés [124] et dès qu'une condition pour une mission classée comme simple ne sera pas respectée, une AESC sera requise. La gestion du trafic de drones ou *Unmanned Traffic Management* (UTM) en Europe, qui sera hautement digitalisée et connectée [248, 61] et qui vise à faciliter l'accès routinier aux opérations de drones en milieu urbain, proposera des solutions pour l'autorisation automatisée de vols de drones et la déconfliction stratégique, c'est-à-dire pour vérifier sur la base des plans de vols prévus s'il peut y avoir un risque de collisions entre deux drones durant leurs opérations. Cependant, il n'existe pas de solution pour vérifier et valider si une demande d'autorisation pour une mission complexe propose un niveau de maîtrise des risques suffisant pour une exploitation, de manière systématique et automatisée. Le processus reste manuel, tant pour l'exploitant qui soumet sa demande que pour le régulateur, expert en charge d'analyser cette demande avant d'accorder ou non l'AESC, au cas par cas.

La phase de préparation de la mission dont font partie l'étude de sécurité et le processus de demande d'autorisation est souvent négligée par rapport à

la phase d'exécution du vol. Du côté académique, peu de recherche sont consacrées à la planification du vol, bien qu'il existe de nombreuses contributions pour soutenir la sécurité durant la phase de vol, aussi bien pour le télépilote [37, 173, 267] que pour le contrôleur aérien [44, 101, 183]. Des recommandations et des outils pour vérifier l'utilisabilité des logiciels existent cependant et sont largement utilisés depuis plusieurs décennies [23, 206]. Du côté opérationnel, les données de l'Agence Fédérale américaine pour l'Aviation (FAA) indiquent que 70 à 80% des demandes d'autorisation sont rejetées à cause d'informations manquantes. La plupart d'entre elles ne traitent pas suffisamment les risques et ne sont pas conformes à la réglementation pour les opérations envisagées [2].

Concernant les drones évoluant à proximité des personnes, des revues de la littérature sur les Interactions Humain-Drones (IHD) [264, 25] identifient également que seul un petit nombre de publications propose des résultats empiriques. De plus, les données de terrain disponibles sur les pratiques professionnelles de drones sont peu nombreuses comme identifié dans [180]. Nous disposons donc de relativement peu de connaissance sur les procédures de pilotage ou la manière dont les mesures de sécurité et la protection de la responsabilité sont réellement mises en œuvre.

Ljungblad *et al.* [181] ont mené des entretiens avec des pilotes de drones professionnels pour guider les travaux futurs en IHD. Un aspect mis en avant est le fait que la phase de vol ne représente qu'une petite part de l'activité par rapport à la préparation de mission ou le traitement des données après le vol. La prise en compte de la sécurité des opérations, c'est-à-dire la prévention des risques non malveillants pouvant survenir, est un enjeu majeur, et surtout une perspective essentielle identifiée pour soutenir le travail des pilotes. Par exemple, l'analyse des risques associés à une mission est un aspect important de l'activité de pilotage professionnel de drones qui ne dispose que de peu d'outils d'après les participants de leur étude. La réalisation de missions avec des risques potentiels plus élevés, comme les missions endurantes sur plusieurs kilomètres, la proximité d'infrastructures sensibles, ou encore le survol de zones peuplées, nécessite une phase de préparation encore plus importante [29]. En effet, la réglementation européenne [59] impose une demande d'autorisation préalable sur la base d'un concept d'opération et d'une étude de sécurité. Ce processus, contrairement aux simples déclarations qui sont demandées dans les cas étudiés par Ljungblad *et al.* [181], implique plusieurs parties prenantes comme les opérateurs, les télépilotes mais également les régulateurs. Il s'agit d'un processus collaboratif qui n'est pas, à notre connaissance, étudié en situation réelle avec de multiples points de vue de professionnels. Les études de sécurité sont souvent complexes à réaliser et peu outillées en termes d'IHD comme identifié par [229]. Des modèles et des outils ont été proposés pour aider la réalisation d'études de sécurité, comme l'imbrication de petits dossiers de sécurité pour constituer des dossiers complets [6, 284], ou la création de base de données [27] et de modèles des risques standards pour les missions de drones [300]. Des outils proposent d'aider les utilisateurs à réaliser leurs études de sécurité en utilisant des modélisations du système [73, 236] mais nécessitent une expertise en méthodes formelles pour être utilisés. À notre

connaissance, aucune étude n'a été menée sur les exploitants devant requérir une demande d'autorisation d'exploitation.

En conclusion, nous pensons qu'il est nécessaire d'étudier les processus et interactions entre les parties prenantes, opérateurs et régulateurs, pour la réalisation de missions de drones présentant des risques potentiels forts. Nous pensons qu'il est possible d'améliorer la sécurité des missions de drones en concevant des outils pour la phase de préparation prenant en compte les besoins des opérateurs humains.

D'où les questions de recherche principales : *Pour assurer la sécurité des opérations commerciales de drones civils en catégorie d'exploitation spécifique, quels sont les aspects importants des processus d'étude de sécurité et de demande d'autorisation ? Comment rendre ces processus plus utilisables ?*

1.1 Domaines de recherche

Cette recherche se trouve à l'intersection de plusieurs domaines. Tout d'abord, elle se déroule dans le cadre général de l'**Interaction Humain-Machine** (IHM) en **informatique**. Elle propose des outils et concepts visant à comprendre les tâches des exploitants qui souhaitent opérer dans la catégorie qui nécessite une AESC ainsi que celles des autorités qui délivreront ou non cette autorisation, ainsi que le travail collaboratif réalisé par les parties impliquées. Par ailleurs, elle propose des méthodes de conception d'outils davantage utilisables pouvant soutenir l'ensemble de ces activités. Ici *utilisable* se réfère à la définition de l'ISO 9241-11 :2018, qualifiant le *"degré selon lequel un système, un produit ou un service peut être utilisé, par des utilisateurs spécifiés, pour atteindre des buts définis avec efficacité, efficience et satisfaction, dans un contexte d'utilisation spécifié"* [147].

Nos travaux appliquent les concepts de la géomatique tels que l'**analyse géovisuelle** et les **interactions pour l'exploration de données spatiales**.

Le domaine d'application de cette thèse est celui de la **sécurité aéronautique** et doit tenir compte de la réglementation en vigueur, des méthodologies, des pratiques et des outils pour les tâches d'étude de sécurité et de demande d'autorisation des missions de drones.

1.2 Prise de position

J'ai identifié que les paramètres opérationnels, ou PO, étaient un élément clé des processus : leur identification, leur valeur, leur représentation et leur manipulation par l'utilisateur ou par des calculs sont essentiels pour décrire une mission, l'étudier, raisonner et collaborer.

Je montre alors qu'il est possible de proposer des outils plus utilisables tout

en maximisant la sécurité en outillant les processus d'étude de sécurité de missions de drones et de demande d'AESC selon trois axes. Le premier axe est l'automatisation, à deux niveaux. D'abord, au niveau des dépendances entre les paramètres opérationnels. La modification d'une valeur d'un PO peut avoir pour conséquence la mise à jour d'autres PO qui en dépendent. L'enjeu à ce niveau est l'*identification* et le *calcul* des valeurs des PO utiles *pour décrire* la mission ainsi que leurs *relations*. Dans un second temps, les tâches de plus haut niveau comme l'inclusion et la génération des parties du document qui auront aussi changé en conséquence des modifications des PO peuvent être automatisées. Ces tâches sont fastidieuses, répétitives ou difficiles pour l'exploitant et accélérer leur réalisation favorise les itérations de son analyse de sécurité.

Le deuxième axe est le support à la réflexion et la créativité, correspondant à l'augmentation d'Engelbart [91], en proposant des représentations et des interactions qui permettent à l'exploitant d'explorer les différents PO qui décrivent sa mission. Il s'agit de la mise en oeuvre du concept d'analyse géovisuelle, en se basant sur la *représentation* et la *manipulation* des PO *sur une carte interactive*. La carte obtenue décrit partiellement le *concept d'opération* et permet la *visualisation* de l'étude de sécurité.

Le troisième axe est le support à la collaboration des exploitants avec le régulateur. Leur langage commun sera la *valeur* des PO et leurs *implications*, *durant la négociation* jusqu'à atteindre un niveau de risque accepté par les deux parties. Je n'ai que superficiellement exploré ce dernier axe dans cette thèse, mais les prescriptions de la littérature sur la nécessité d'une communication et d'une collaboration entre les acteurs [140, 59, 104] ou l'*existence de tâches de négociation et d'information* dans le modèle décrit du processus indiqué dans le Chapitre 4 vont dans ce sens. L'approfondissement et l'exploitation de ce troisième axe restent une des perspectives de ma thèse.

1.3 Méthodes mises en oeuvre

La préparation de missions de drones est un processus technique complexe et réglementé [60], d'autant plus qu'il existe une diversité d'opérations possibles. Seules les prescriptions réglementaires peuvent contraindre les opérateurs. [83]. Afin de mieux comprendre les demandes d'autorisation, de concevoir de nouvelles interactions et d'évaluer leurs impacts sur le processus de réalisation de mission de drone ainsi que la sécurité des opérations, tout en tenant compte de cette complexité, j'ai adopté l'approche *Research Through Design* ou recherche par le design, selon Findeli [100]. Elle permet de traduire l'expérience directe de conception et de réalisation d'un artefact ainsi que les interactions avec ce dernier en connaissance scientifique. Elle favorise une approche de la construction d'artefacts basée sur l'essai et l'erreur, qui est constamment réalignée afin de mieux répondre aux questions de conception difficiles [269]. Ainsi le chercheur se sert du projet comme champ d'études pour la collecte de données, et la viabilité du projet de conception détermine la validité du choix du champ.[118]. Si le projet réussit et que l'artefact créé est acceptable, alors les connaissances créées

par le processus sont également valides, conformément à l'affirmation de Biggs et Büchler selon laquelle la rigueur du processus valide le produit [34].

J'ai eu recours à plusieurs méthodes centrées sur l'utilisateur, en triangulant entre observation, conception et théorie [187]. La figure 1.1 montre les différentes études réalisées durant la thèse en suivant une adaptation de ce cadre de triangulation. Les éléments en pointillés indiquent la consolidation et/ou des itérations. Les blocs à droite indiquent les méthodes utilisées à chaque chapitre et en italique les contributions obtenues à la fois concernant l'utilisabilité et la sécurité.

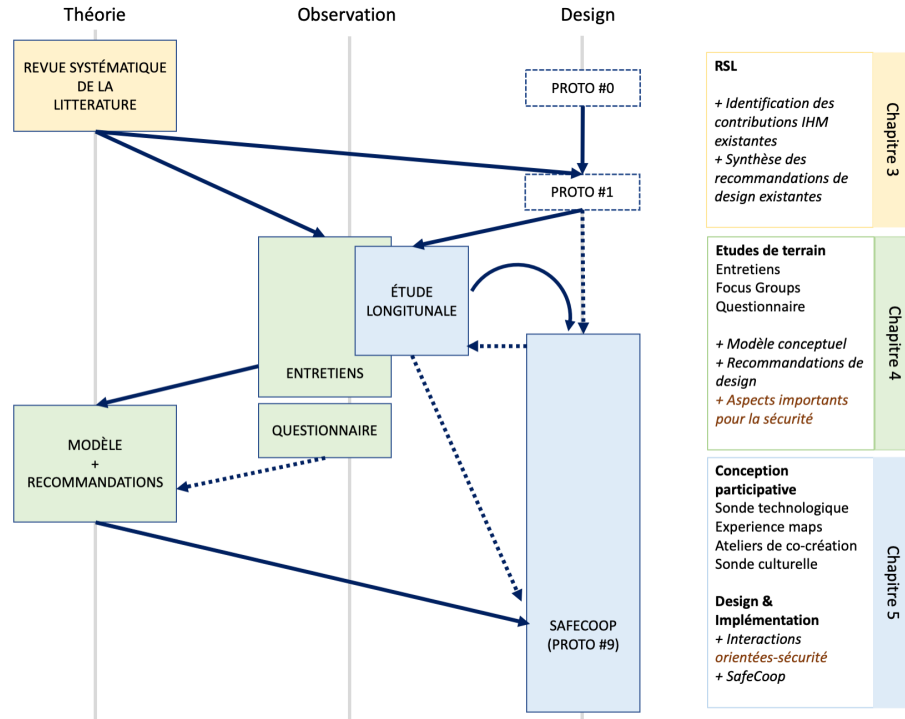


FIGURE 1.1 – Mes recherches utilisent différentes méthodes telles que la revue systématique de littérature, les entretiens, les questionnaires et la réalisation de prototypes interactifs basés sur des cartes en lien avec des modèles théoriques.

1.3.1 Revue Systématique de la Littérature

J'ai effectué une Revue Systématique de la Littérature (RSL) afin d'identifier les contributions à la sécurité des opérations de drones existantes en IHM, pour servir de base de départ pour cette recherche. Même si une approche rigoureuse n'exclut pas nos connaissances préalables ou de potentiels biais, l'objectif était

de mener un travail systématique à toutes les étapes afin que les lecteurs puissent inspecter, évaluer et exploiter les résultats.

La revue systématique est considérée comme une méthode solide et rigoureuse pour réaliser une revue de littérature et établir l'état de l'art sur un sujet à un moment donné [277]. Elle est transparente et reproductible grâce à un protocole établi bien avant son exécution. Une RSL bien exécutée permet de repérer la grande majorité des documents (publiés ou non) et dispose de nombreux mécanismes pour éviter les biais [278]. De plus, une RSL est semblable à une expérience scientifique et la cartographie systématique des connaissances qui en résulte constitue une contribution en elle-même [179, 256].

Il n'existait pas de RSL sur le soutien à la sécurité des opérations de drones sur laquelle m'appuyer, ainsi cette thèse débute naturellement par ce travail préliminaire essentiel. Le chapitre 3 en détaille l'exécution et les résultats.

1.3.2 Entretiens

J'ai réalisé des entretiens avec de nombreux acteurs de la filière Drones, à la fois des opérateurs de drones, des constructeurs et des régulateurs. Cette méthode de recueil d'informations permet de comprendre les activités, les buts, les besoins et le contexte des utilisateurs des futurs systèmes. Les réponses obtenues ne sont pas systématisées comme dans le cas d'un questionnaire, ce qui permet d'avoir des données riches et authentiques. Cette méthode permet d'explorer une problématique en la confrontant aux personnes concernées [162]. Elle permet notamment de découvrir les besoins cachés grâce à ce qui est décrit par les personnes participant aux entretiens, plutôt que d'analyser ce qui est prescrit par les procédures ou la réglementation. Les différents profils des participants permettent d'avoir le point de vue de chaque acteur participant aux missions complexes, comme décrit dans le chapitre 4.

Mis à part Ljungblad *et al.* [181] qui se sont entretenus avec des exploitants de drones opérant dans la catégorie avec le moins de risques, il existe peu de données décrites sur les opérateurs de drones et leurs activités. À plus forte raison, les opérateurs en catégorie spécifique sont moins nombreux que ceux de la catégorie ouverte interviewés par Ljungblad *et al.* Il n'existe pas non plus de données disponibles traitant du point de vue de ceux qui autorisent les missions en catégorie spécifique.

1.3.3 Groupe de discussion

Pour évaluer le concept du point de vue des régulateurs, il n'était pas possible de leur demander de tester l'outil, vu leur emploi du temps très chargé. J'ai donc mis en oeuvre des groupes de discussion (*focus group*) avec des régulateurs et des contrôleurs aériens. Ces deux types de rôles sont des parties prenantes durant les opérations de drones qui se déroulent sur les aéroports, qui est le cas d'utilisation de l'étude longitudinale avec un seul participant, dénommé P1 par la suite.

Un groupe de discussion est une méthode qualitative de recueil de données sur un sujet particulier et prédéfini, en se basant sur les discussions et échanges

d'un groupe de participants [200]. Cette forme d'entretien collectif a servi à vérifier et valider les fonctionnalités offertes par SafeCoop, pour savoir si les participants aux groupes de discussion pourraient l'utiliser, comment et ce qui manque à leurs yeux et imaginer de nouvelles fonctionnalités.

1.3.4 Questionnaire

J'ai soumis un questionnaire en ligne aux personnes interviewées précédemment (P1, opérateurs, régulateurs), pour voir à quel point ils étaient d'accord avec le modèle du processus de demande d'autorisations et les recommandations établis suite aux entretiens. Le questionnaire permet aussi de savoir quelles sont les recommandations à prioriser, lesquelles garder et lesquelles enlever.

1.3.5 Co-conception

Des méthodes de co-conception ont été utilisées pendant les phases de design, alors que les méthodes précédentes ont servi pour les phases théoriques et empiriques.

Pour commencer avec un cas d'utilisation précis, j'ai donc mis en oeuvre la conception participative avec l'utilisateur unique P1, durant *une étude longitudinale* de huit mois, dont les résultats sont décrits dans le chapitre 5. Elle a abouti à un prototype nommé SafeCoop, qui propose un *cadre unifié des trois phases d'une opération* de drones, les rendant plus sûres, au sein d'un même environnement. Ce prototype interactif démontre aussi des *interactions soutenant les études de sécurité des opérations* de drone ou "orientées sécurité", en plus d'interactions facilitant le *partage d'informations* entre les acteurs du processus. Nous avons effectué des ateliers de co-création avec P1, avec parfois la participation des membres de l'équipe d'encadrement. Ces ateliers ont permis à P1 de s'impliquer pour la génération des idées autant pour atteindre les objectifs de ses différentes tâches à réaliser que pour les interactions susceptibles de l'aider à y parvenir.

La conception participative est une approche de conception d'un produit qui fait intervenir les utilisateurs à plusieurs moments du cycle de conception. En tant qu'utilisateurs, ils doivent participer aux décisions qui affecteront le futur système, notamment comment il est conçu et comment il sera utilisé [123]. En mobilisant son expertise du domaine, les utilisateurs deviennent des collaborateurs et des innovateurs [162]. Pour SafeCoop, la conception participative a servi pour la définition des besoins et l'amélioration des interactions disponibles.

Une version basique à base de couches a été utilisée comme *sonde technologique* au début de l'étude longitudinale. Le principe d'une sonde technologique est de mettre entre les mains des utilisateurs un prototype de produit et en faire documenter son usage sur une période donnée permet de comprendre les besoins et désirs des utilisateurs du produit, de tester la technologie et d'inspirer de nouvelles idées pour améliorer le produit [136].

Entre les ateliers de co-création, il était essentiel de garder une trace de comment P1 utilisait le prototype afin de savoir vers quelle direction l'amener. Ayant eu le prototype de base de SafeCoop entre les mains pendant plusieurs mois, P1 a collecté des données sur ses activités, avec les difficultés et les points positifs pendant l'utilisation, fournissant ainsi la matière pour l'étude longitudinale. Celles-ci ont servi pour la recherche de solutions adaptées à l'utilisateur, en entrée des ateliers de co-création.

Le principe d'une *sonde culturelle* a pour vocation d'inspirer des idées de conception en stimulant l'imagination des utilisateurs puis des concepteurs, en début de projet [115]. Dans cette recherche, nous avons fait l'inverse : utiliser une sonde culturelle pour recueillir des données à la fin du projet. En effet, à la fin des huit mois de l'étude longitudinale avec P1, il était essentiel de connaître les points forts, les points à améliorer et les perspectives possibles de la version finale du prototype, du point de vue de l'utilisateur final, sans le limiter à une série de questions. Notre sonde culturelle a pris la forme d'une lettre de rupture écrite par l'utilisateur pour SafeCoop. Cela permet d'avoir un recul de quelques semaines après que ses buts aient été atteints et sans avoir utilisé le prototype pendant un certain moment.

1.4 Contributions

Dans cette thèse, je caractérise le processus de demande d'autorisation pour les missions de drones à risques modérés, notamment les différents acteurs, leurs interactions, les tâches nécessaires et les difficultés rencontrées. Je propose ensuite des recommandations validées par les acteurs. Enfin, j'en implémente certaines dans un démonstrateur : SafeCoop.

La liste des publications issues de cette thèse se trouve à l'annexe A. Les contributions de cette thèse sont présentées selon les trois axes de la triangulation de Mackay et Fayard [187] : empiriques, théoriques et relatives au design.

1.4.1 Contributions empiriques

Les aspects importants de la sécurité des opérations de drones en catégorie d'exploitation spécifique sont identifiés et caractérisés :

- le processus de demande d'autorisation est long et complexe car il implique plusieurs étapes nécessitant plusieurs acteurs avec des priorités différentes, des interprétations inégales de la réglementation puis chaque acteur a ses propres délais ;
- la culture de la sécurité n'est pas la même parmi les exploitants de drones, par rapport à leurs expériences précédentes ;
- des tensions entre sécurité et objectifs commerciaux existent, la réglementation et la faisabilité technique devant être prises en compte pour chaque demande ;
- des tensions entre sécurité et vitesse existent ;

- la sécurité est un processus créatif et nécessite d’être soutenue par des interactions dédiées ;
- un cadre unifié améliore la sécurité : les outils actuellement utilisés ne permettent pas d’intégrer toutes les phases d’une mission de drone, proposent des représentations hétérogènes aux utilisateurs et ne sont pas dédiés à soutenir les tâches évoquées au point précédent ;
- pour notre domaine d’étude, l’aspect collaboratif de la sécurité est minimisé par les prescriptions et cela a des conséquences néfastes et imprévues à la fois pour la sécurité ainsi que pour l’utilisabilité.

Ces éléments répondent à la première question de recherche de la thèse.

1.4.2 Contributions théoriques

Afin de répondre à la seconde question de recherche de la thèse, des éléments permettant de concevoir les futurs systèmes rendant les processus d’étude de sécurité et de demande d’autorisation d’exploitation en catégorie spécifique des drones sont proposés, à savoir :

- une synthèse des recommandations existantes dans la littérature pour concevoir des interfaces et des interactions soutenant la sécurité des opérations de drones ;
- le processus de demande d’autorisation modélisé en trois tâches : la description du concept d’opérations et l’étude de sécurité par l’exploitant puis la négociation entre tous les acteurs ;
- neuf recommandations pour outiller ces processus.

1.4.3 Contributions relatives au design

Ces contributions techniques ont consisté à réaliser des éléments logiciels implémentant les contributions théoriques précédentes et traitant certains aspects identifiés dans les contributions empiriques. J’ai conçu et développé :

- *SafeCoop*, qui permet aux opérateurs de décrire et d’itérer sur leurs concepts d’opérations, de réaliser des études de risque de façon géo visuelle et de partager les données sous forme graphique ou textuelle entre les acteurs ;
- en particulier, *SafeCoop* propose un cadre unifié pour les trois phases d’une mission de drone, améliorant ainsi la sécurité car la préparation de mission est intégrée avec le système, évitant le vide sémantique donc facilitant le suivi durant le vol puis offre un outil pour le jeu après le vol ;
- *SafeCoop Toolkit* met à disposition des développeurs les primitives utilisées pour contruire les interactions conçues pour SafeCoop, sous la forme d’une bibliothèque écrite en javascript ;

1.5 Plan du manuscrit de thèse

Le chapitre 2 introduit les notions nécessaires à la compréhension de la sécurité des missions de drones et l'état de l'art scientifique sur les représentations cartographiques.

Le chapitre 3 décrit une revue systématique de la littérature sur le support à la sécurité des opérations de drones, en se focalisant sur les contributions en matière d'Interactions Humain-Machine.

Le chapitre 4 décrit le processus d'étude de sécurité et de demande d'autorisation. Ses résultats ont découlé d'entretiens avec des opérateurs et les autorités qui valident les demandes, puis ont été consolidés par un questionnaire portant sur les premiers résultats.

Le chapitre 5 décrit une étude longitudinale avec un opérateur unique qui devait réaliser une étude de sécurité et demander une autorisation d'exploitation sur un aéroport contrôlé.

Chapitre 2

Etat de l’art

"A journey of a thousand miles begins with a single step".
– Lao-Tzu

"Learning to fly is not pretty but flying is".
– Satya Nadella

Ce chapitre détaille les éléments du soutien à la sécurité des opérations de drones. Il présente en premier lieu les systèmes de drones et les risques associés, en deuxième lieu la maîtrise de ces derniers et en dernier l’usage des représentations cartographiques dans le cadre de cette maîtrise de risques. La nature des contributions en IHM, incluant les représentations cartographiques, seront détaillées dans le chapitre suivant avec une Revue Systématique de la Littérature.

2.1 Sécurité des opérations de drones

Cette section introduit les drones, leurs opérations et comment la sécurité aérienne de ces dernières sont gérées de nos jours.

2.1.1 Drones ou aéronefs sans pilotes à bord

Les drones ou *Unmanned Aircraft Systems* (UAS) sont des aéronefs sans pilote à bord. À l’origine, le terme drone désigne un aéronef piloté à distance qui servait aux missions “*Dirty, Dull, Dangerous*” (3D) pour “Sales, monotones et dangereuses” [36]. *Sales* car ils étaient envoyés dans des environnements où les conditions seraient néfastes pour un pilote à bord, comme les endroits contaminés avec des produits chimiques ou une radioactivité élevée. *Monotones* car ils permettaient d’automatiser le travail répétitif ou qui durerait longtemps sans changement majeur pendant une grande partie du temps. *Dangereuses* car ils étaient utilisés dans les situations où la présence d’un pilote à bord n’était pas désirable à cause des risques pour son intégrité physique, par exemple pour

servir de cible d'entraînement pour la défense anti-aérienne. De nos jours, au-delà d'une pratique de loisir, les exploitations des UAS peuvent être groupées en plusieurs domaines d'application : télémessures, inspections industrielles, cinématographie/photographie aérienne, surveillance et reconnaissance, réponse aux urgences, ou encore collecte d'informations atmosphériques. Un dernier domaine concerne les applications requérant des interactions physiques avec des substances, des matériaux et des objets - dont la livraison par drones fait partie [36].

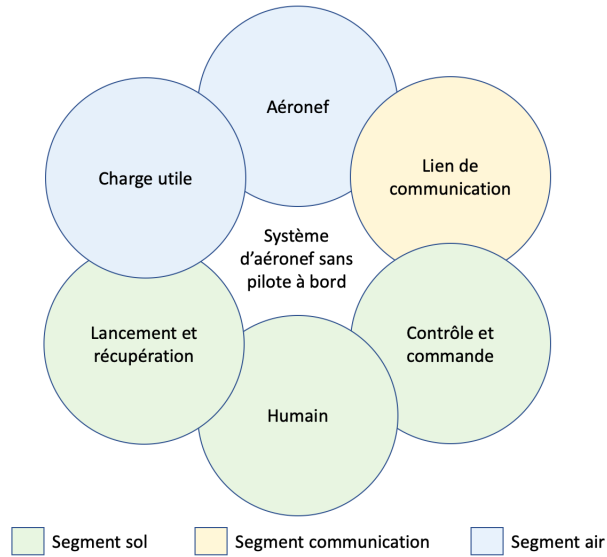


FIGURE 2.1 – Vue synthétique des éléments d'un système de drones - adapté de [41]

Les systèmes de drones [41] sont composés de trois segments principaux :

- le segment air, soit le ou les aéronefs composés de divers équipements (propulsion, batterie, électronique embarquée et capteurs) ainsi que leur charge utile (une caméra, des poches de sang, ou même des passagers non-pilotes dans les futurs taxis volants) ;
- le segment sol, qui comprend la station de contrôle au sol, les éléments pour le décollage et la récupération ainsi que l'équipage humain qui exploite ou supervise le système ;
- le segment de communication, permettant le lien entre le segment sol et le segment air, et pouvant inclure l'usage de satellites.

Il existe différentes classifications des drones, dont une basée sur la taille et l'endurance [50]. De façon générale, plus un drone est grand, plus ses capacités sont élevées et plus les risques qu'il engendre sont importants. L'importante variété d'opérations de drones implique le recours à des engins de tailles, de masses et de puissances différentes.

2.1.2 Opérations de drones

Une opération de drone est généralement composée de trois étapes : la préparation du vol en amont puis sur site, l'exécution du vol et l'après-vol qui inclut le traitement des données obtenues le cas échéant [31, 298].

L'étape avant-vol regroupe toutes les activités nécessaires pour la préparation de l'exécution du vol. Il s'agit des activités de définition du concept d'opération : où va-t-on voler, quand, dans quel but, dans quelles conditions, pendant combien de temps, avec quelles ressources humaines, avec quel système, etc. Ces activités sont suivies de celles d'études de sécurité et d'obtention des différentes autorisations nécessaires pour que le vol soit sûr et légal par rapport au concept d'opérations élaboré. Cette étape est la plus longue durant une opération de drones [181]. Elle comprend aussi les activités de déploiement du système et des mesures de réduction du danger juste avant le début du vol proprement dit, ou pré-vol.

Ensuite, l'étape du vol est celle pendant laquelle l'aéronef est exploité. Elle commence quand l'aéronef est prêt à manœuvrer en vue du vol et se termine au moment où il s'immobilise à la fin du vol et où le système de propulsion principal est arrêté définitivement [140]. Les moments où l'aéronef est au sol pour des raisons de maintenance comme pour le remplacement des batteries ; ou des raisons de sécurité comme dans le cas d'un conflit avec un aéronef 'intrus', suite à l'application du principe 'voir et éviter' [137], font partie de cette étape.

Enfin, l'étape de l'après-vol comprend le repli du système si nécessaire, l'exploitation des données acquises le cas échéant, le traitement des événements de sécurité et des retours d'expérience.

Types d'opérations

D'un point de vue technique et sans considération de l'objectif du vol, on distingue deux types d'opérations : les missions en **vue directe**, ou *Visual Line of Sight* (VLOS) durant lesquelles le pilote à distance doit maintenir un contact visuel permanent avec le drone, sans autres aides que des lunettes de correction de la vue [59] car il est responsable de l'évitement de collision avec les autres aéronefs et les obstacles ; et les missions **hors-vue**, ou *Beyond Visual Line of Sight* (BVLOS) dès que le contact visuel entre le télépilote et l'aéronef ne peut pas être maintenu. Les vols en BVLOS sont considérés comme plus dangereux alors que c'est aussi le mode d'exploitation le plus avantageux. En effet, ils permettent de réduire les coûts par rapport aux systèmes tels que les hélicoptères ou les satellites. De plus, ils permettent de franchir davantage de distance et d'avoir des systèmes plus automatisés que les opérations en vue, réduisant aussi les durées nécessaires pour les opérations et permettent un gain en sécurité en n'exposant pas l'équipage à des conditions dangereuses ou en atteignant des lieux difficiles d'accès [36, 99].

Il existe un cas particulier où des observateurs externes assistent le pilote quand le drone s'éloigne trop de sa position et que la ligne de vue ne peut pas être maintenue : la **ligne de vue étendue** ou *Extended VLOS* [59]. Dans ce cas, des moyens de communication entre les différents observateurs participant à la surveillance des drones doivent être mis en place.

2.1.3 Sécurité des opérations de drones

Pour l'Organisation de l'Aviation Civile Internationale (OACI), les activités de drones sont une des composantes de l'aviation. L'OACI considère la sécurité comme son premier objectif stratégique et a la priorité absolue par rapport aux autres objectifs : capacité et efficacité ; sûreté et facilitation ; développement économique ; et protection de l'environnement [143].

L'introduction des aéronefs sans pilote à bord dans le système de l'aviation crée inévitablement des dangers. De plus, les caractéristiques des drones, comme l'absence de pilote à bord, la nécessité d'être conforme aux exigences réglementaires de l'espace aérien et la proximité avec le sol dans le cas des petits drones requièrent des particularismes dans la gestion de la sécurité de leurs opérations [27].

Nous aborderons les dangers présentés par les drones et leurs conséquences, les différentes méthodes d'évaluation des risques possibles et les mesures d'atténuation mises en place, à savoir la réglementation sur les drones et les services qui en découlent. L'annexe B donne davantage de détails sur la réglementation et la sécurité aériennes.

Les dangers liés à l'exploitation de drones

Hayhurst *et al.* [130] ont défini les dangers des opérations de drones à partir de ceux connus de l'aviation avec pilotes à bord mais en tenant compte des caractéristiques propres à l'absence de pilote. 132 conditions de défaillance pendant la phase de vol ont été déterminées, réparties entre les fonctions principales réalisées par le système de drone : "faire voler l'aéronef", "naviguer", "communiquer" et "se prémunir et atténuer les dangers potentiels".

Dans une approche plus systémique, Clothier [58] place l'étude des risques des opérations de drones dans un contexte intégrant la gestion du trafic aérien, l'aspect humain, et un système de gestion de la sécurité. Il synthétise certaines méthodes d'identification des dangers et d'évaluation des risques pour un système de drones. Pour lui, les conditions de défaillance appartiennent à cinq catégories, à savoir les éléments propulsifs, les éléments pour contrôler le vol, les éléments au sol, les éléments de communication et les autres dont les problèmes relatifs à l'usage de l'espace aérien. Des recommandations sont proposées pour le traitement, l'élaboration et la sélection des mitigations à mettre en oeuvre pour chaque risque. Son étude fournit des statistiques sur les causes des accidents et leur proportion par rapport aux éléments d'un système. Sa synthèse

des méthodes d'identification des dangers se base sur des statistiques excluant les petits drones et concernant les événements entre 1993 et 2003.

En étudiant les accidents¹ et les incidents² pouvant résulter d'une opération de drone, Dalamagkidis *et al.* ont déterminé les conséquences néfastes possibles [66]. Elles peuvent consister en des blessures ou décès de personnes, des dommages importants sur le système voire sa perte, des dommages sur d'autres biens, ou encore des impacts négatifs sur l'environnement et la société.

Plus récemment, Belcastro *et al.* [27], dans une approche systémique, ont caractérisé le problème d'identification des risques liés aux opérations et au trafic de drones. Ils le considèrent comme un problème multidimensionnel où sont pris en compte 1) les sources de dangers et leurs conséquences potentielles à plusieurs niveaux : véhicule, environnement, opérations, le système de gestion de trafic ; 2) la densité de population à plusieurs niveaux allant de quasi vide à surpeuplé ; et 3) la complexité opérationnelle allant d'un seul drone opéré en ligne de vue sans autre aéronef aux alentours à des essaims de drones autonomes, hors-ligne de vue dans un trafic coopératif. Leur étude traite 100 événements relatifs aux drones de moins de 25kg. Les dangers actuels et à venir sont aussi identifiés, sur la base de jugements d'experts, sur des cas d'utilisation actuels et envisagés, ces derniers ayant été tirés d'articles académiques prospectifs [146, 270, 119, 285].

Larrow [2] couvre les dangers potentiels en prenant en compte l'environnement opérationnel et l'intégration à un système de gestion de trafic de drones sans se limiter à l'aéronef en vol. Il classifie les dangers selon 4 catégories principales, notamment l'environnement d'opération, l'impossibilité de 'voir et éviter', la détérioration des systèmes externes et les erreurs humaines. Dans cette dernière catégorie, il regroupe les erreurs lors de la planification de mission, les erreurs de maintenance, la fatigue et la mauvaise communication entre les pilotes à distance ou entre le pilote et les observateurs externes.

Allouch *et al.* [10] prennent en compte les dangers liés à la cybersécurité. Leur étude divise les dangers potentiels pour un système de drone piloté via internet en deux catégories : interne et externe. Dans les dangers intrinsèques au système de drones ou interne, concernant les sources des erreurs humaines, ils indiquent un manque de culture de la sécurité, des erreurs de pilotage et les risques liés à la cybersécurité. Ces risques sont constitués des vulnérabilités liées à l'humain. Elles permettraient d'exploiter les défaillances de la station de contrôle, de l'aéronef et des communications.

L'Agence Européenne pour la Sécurité de l'Aviation (EASA) a identifié les domaines à risque majeur comme les conflits en vol, les collisions avec des personnes ou des biens au sol, la perte de contrôle, les défaillances moteurs et

1. Un accident est un événement lié à l'utilisation d'un aéronef au cours duquel *soit* une personne est mortellement ou grièvement blessée du fait qu'elle ait été dans l'aéronef, ou en contact avec une partie quelconque de l'aéronef y compris celles qui s'en sont détachées, ou directement exposée au souffle des réacteurs ; *soit* l'aéronef subit des dommages à tel point que ses caractéristiques de résistance structurelle, de vol ou de performances sont altérées et qu'un remplacement ou une réparation importante des éléments incriminés soit nécessaire ; *soit* que l'aéronef ait disparu ou est totalement inaccessible .

2. Un incident est un événement, autre qu'un accident, lié à l'utilisation d'un aéronef, qui compromet ou pourrait compromettre la sécurité de l'exploitation.

les autres défaillances du système [94]. Les catégories de causes identifiées sont l'opérationnel, le technique et l'humain. La catégorie "opérationnel" concerne les écarts par rapport aux opérations normales, la gestion des trajectoires, la violation des espaces aériens contrôlés ou la proximité avec les autres aéronefs en espace aérien non contrôlé. La catégorie "technique" concerne les défaillances du système de contrôle, du système de propulsion ainsi que des générateurs d'énergie. La catégorie "humain" concerne la maintenance ou la construction du système, les connaissances aéronautiques des exploitants et pilotes à distance ainsi que la préparation de missions.

Les dangers identifiés ont lieu pendant la phase de vol mais ces travaux montrent que les erreurs humaines, dont une mauvaise planification de mission, peuvent en être la cause [2, 94]. Une fois les dangers identifiés, les risques qui pourraient en découler doivent être évalués puis mitigés ou ignorés selon la situation.

Évaluation des risques liés aux opérations de drones

Dans la plupart des cas, les méthodes d'identification et d'évaluation des dangers ne sont pas spécifiques à l'aviation [148]. Il existe de nombreuses revues de ces méthodes, pour différents domaines : la santé [117], les traitements et processus en chimie [63], le génie civil [223], la navigation maritime [210], l'aviation civile [205], et le domaine des drones [21]. EUROCONTROL a publié un rapport sur 520 méthodes et techniques pouvant être appliquées durant les études de sécurité dans le cadre de son programme européen de gestion du trafic aérien [93].

D'une part, la recherche dans l'évaluation des risques est foisonnante et de nombreuses approches ou méthodes innovantes sont créées. Elles s'inspirent de celles existantes ou les combinent afin de tirer profit des avantages de chacune des méthodes. Par exemple, Belcastro *et al.* utilisent à la fois des données d'accident et des cas d'applications prospectifs tirés de la littérature, puis un jugement d'experts pour en tirer des conclusions [27] ; Allouch *et al.* exploitent une approche qualitative basée sur les standards internationaux, puis des réseaux bayésiens pour modéliser les risques liés au vol d'un aéronef sans pilote à bord [10] ; Chatzimichailidou *et al.* réalisent une analyse appelée *System-Theoretic Process Analysis* (STPA) puis appliquent la méthodologie *Risk Situation Awareness Provision Capability* pour quantifier les différences entre 4 modèles de drones, afin d'évaluer la mesure dans laquelle ils remplissent les exigences de sécurité identifiées [53] .

D'autre part, la diversité des systèmes de drone et des possibilités d'application rendent complexe la tâche d'évaluation des risques. En effet, puisque les exigences de sécurité doivent être proportionnelles aux risques encourus, une matrice de tolérabilité unique des risques pour à la fois les gros drones et les petits est inappropriée [66].

Enfin, l'approche traditionnelle des risques en aviation, qui consiste à certifier toute la chaîne depuis le type de l'aéronef, chacun des exemplaires construits,

les opérations envisagées par l'exploitant et ensuite exiger une license pour le pilote, semble inadaptée aux opérations de drones. Certes, les gains en matière de sécurité sont reconnus mais cela engendrerait des difficultés, des coûts et des délais qui pourraient empêcher le développement du secteur [2]. Sans négocier la sécurité à la baisse, l'Organisation de l'Aviation Civile Internationale (OACI) demande aux opérations de drones un niveau équivalent de sécurité à celui de l'aviation avec pilote à bord [139]. Ainsi, une approche dite *holistique* est prônée. Elle s'appuie sur toutes les mitigations utilisées durant une opération de drone en plus de celles implémentées durant la conception de l'aéronef pour démontrer que ladite opération peut être réalisée avec un niveau de risque acceptable [2].

Plusieurs méthodologies permettent de réaliser une évaluation du risque opérationnel [2, 170]. La méthodologie nommée *Specific Operation Risk Assessment* (SORA) a été développée afin de systématiser les études de sécurité des opérations de drones et pour intégrer l'approche holistique [104]. Il s'agit d'un processus itératif d'identification systématique des risques associés aux exploitations complexes de drone : les requérants choisissent en dix étapes où, quand et comment ils exploiteront leur drone sans danger pour des personnes ou des objets dans les airs ou au sol [104]. A partir de l'analyse du risque air et du risque sol lors d'une opération de drone, cette méthodologie permet d'établir des objectifs de sécurité opérationnels à atteindre, afin de déterminer les meilleurs moyens à mettre en œuvre pour rendre ces risques acceptables.

Pour assurer une certaine flexibilité sur ces moyens, elle ne contient pas de prescriptions sur les exigences mais des objectifs de sécurité à atteindre proportionnellement au risque. Il s'agit donc d'une méthodologie basée sur les risques et centrée sur l'opération. La figure 2.2 montre les principales étapes du processus SORA. Au terme du processus, une image précise du type d'exploitation prévu, des risques qui y sont associés et des mesures d'atténuation nécessaires sont obtenues. Elle permet ainsi de déterminer si une opération est réalisable d'une façon sûre.

Cependant, la SORA ne doit ni être utilisée comme une liste de contrôle ni être vue comme la réponse à tous les défis concernant la réalisation des opérations de drones [95]. Bien qu'efficace, elle est jugée comme étant qualitative et complexe [74]. La littérature documentant les applications de la SORA pour plusieurs cas d'utilisation a permis d'identifier certaines lacunes et mises en garde, telles que sa nature chronophage [151], l'absence de traitement des risques liés aux opérations multi-drones [45], ou les avantages à gagner en prenant en compte non seulement la composante spatiale des données sur lesquelles on s'appuie (par exemple la géométrie) mais aussi leur sémantique (par exemple les informations contextuelles, leurs attributs et leurs relations) [7]. Plusieurs autres travaux de recherche portent sur la cartographie et l'évaluation des risques terrestres [221], des risques aériens [189], des risques cyber [271], ou de la conformité aux directives SORA [263]. Les outils en ligne SAMWISE³ et Airhub SORA⁴ aident à la réalisation de la SORA.

3. <https://www.online-sora.com/>

4. <https://sora.airhub.app/>

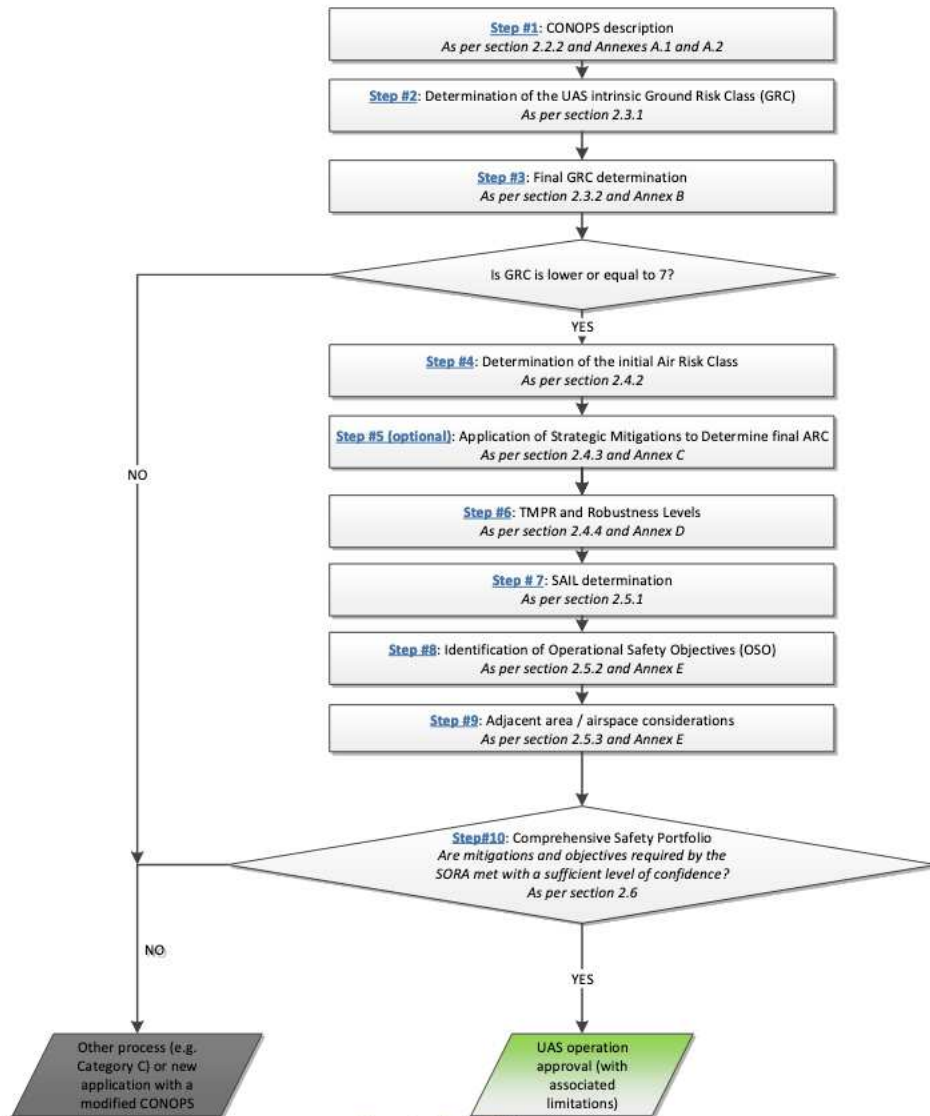


Figure 3 – The SORA process

FIGURE 2.2 – Processus de SORA - Source : JARUS [104]

Atténuation des risques pour les opérations de drones

Pour atténuer les risques relatifs à l'aviation, l'OACI impose des normes qui doivent être traduites en textes réglementaires et appliquées par les États. La mise en oeuvre des préconisations de ces textes doit permettre d'avoir des systèmes, des équipements, des services et des acteurs opérant quotidiennement avec un niveau de sécurité maîtrisé. De nombreuses régions du monde ont commencé à adopter une réglementation pour les drones, conformément aux normes et pratiques recommandées de l'OACI. Pour l'Europe, la réglementation de sécurité applicable aux drones a deux objectifs principaux. D'une part, elle assure la sécurité des autres usagers de l'espace aérien en réduisant le risque de collision en vol. D'autre part, elle assure la sécurité des biens et des personnes au sol en limitant le risque de crash. En plus de la sécurité opérationnelle, l'un des objectifs des réglementations européennes est de favoriser un marché unique pour les drones, tant pour leur conception et fabrication que pour leur exploitation sûre. Des règlements européens ont été édictés ces dernières années pour soutenir cette vision [276]. De plus, la réglementation européenne prévoit que chacun des pays puisse ajouter des éléments réglementaires au dessus du socle commun européen. Ce cadre réglementaire est en vigueur depuis le 1er janvier 2021. Dans cette thèse, nous nous focalisons sur le règlement en vigueur en France.

Le règlement **IR 2019/947** de la Commission Européenne énonce les règles et procédures applicables à l'exploitation des drones [59]. En France, c'est la Direction Générale de l'Aviation Civile (DGAC) qui met en oeuvre cette réglementation [195]. L'approche mise en oeuvre pour garantir la sécurité des opérations de drones consiste à identifier les risques et à fournir des moyens de mitigation pour les réduire en dessous de seuils acceptables. Par exemple, le risque induit par la proximité d'une zone de vol en parachute pourra être atténuée par la réalisation de la mission considérée à une heure pour laquelle la probabilité de croiser un parachutiste est très faible. Une demande d'une zone réservée temporairement au drone seul pourra aussi atténuer ce même risque. Selon les risques qu'elles présentent, les opérations sont classées en trois catégories d'exploitation : ouverte, spécifique ou certifiée.

Catégorie d'exploitation ouverte : elle permet les opérations à faible risque des UAS. Ils s'agit de vols en vue directe, avec des aéronefs de masse inférieure à 25 kg et en zone faiblement peuplée. Dans cette catégorie, les vols ne sont soumis à aucune autorisation préalable.

Catégorie d'exploitation spécifique : elle permet des opérations à risques modérés, quand les conditions en catégorie ouverte ne sont plus respectées, comme lorsque le vol est hors-vue ou est réalisé dans des endroits représentant un risque plus important pour les tiers (en zone peuplée, à proximité d'un aérodrome, etc.). Pour opérer dans cette catégorie, il est nécessaire pour les futurs exploitants, ou "opérateurs", de demander et d'obtenir une autorisation de la Direction de la Sécurité de l'Aviation Civile (DSAC) en France, qui est

l'autorité nationale compétente chargée de la surveillance et de la certification dans le domaine de l'aviation civile, ou "régulateur".

Les autorisations sont délivrées sur la base d'une analyse de risque [59]. L'EASA reconnaît la mise en oeuvre de la SORA comme un moyen acceptable d'obtenir la conformité d'une analyse de risques. D'ailleurs, la traduction en français de SORA est *Evaluation des Risques pour les Opérations Spécifiques* [96]. La réglementation européenne prévoit aussi que l'on puisse voler avec une simple déclaration dans le cadre de scénarios standards (*Standard Scenario* ou *STS*) ou des études de risques prédéfinies (*Predefined Risk Assessment* ou *PDRA*). Si l'opération de drones se conforme à ces exigences, alors une simple déclaration est suffisante car les risques ont déjà été évalués de façon générique pour ces scénarios.

Catégorie d'exploitation certifiée : elle concerne les drones d'une dimension caractéristique supérieure ou égale à trois mètres, ou conçus pour être exploités au-dessus d'un rassemblement de personnes, pour le transport de personnes, et/ou pour le transport de marchandises dangereuses. Elle exige donc une grande fiabilité afin d'atténuer les risques pour les tiers en cas d'accident. Ces vols nécessitent la certification du drone, dans un cadre similaire à celui des aéronefs avec pilotes à bord, ainsi que la certification de l'exploitant et, le cas échéant, la possession d'une licence particulière pour le pilote à distance.

La méthodologie SORA est officiellement reconnue comme méthode d'évaluation des risques par la réglementation [96]. Elle présente des atouts mais est perfectible, comme vu à la sous-section précédente. Une de ses caractéristiques est d'exploiter des données possédant des composantes spatiales comme les trajectoires, les différentes zones tampon, les classes d'espace aérien ou la densité de population de la zone survolée [104]. Cela conduit à s'intéresser aux liens entre les cartes et la sécurité des opérations de drones.

2.2 Liens entre cartes et sécurité des opérations de drones

Les cartes sont utilisées depuis les débuts de l'aéronautique et à différentes étapes d'une mission [194]. Cependant, la littérature en matière de cartes aéronautiques est rare [81]. Ovodas et Česnulevičius ont étudié l'optimisation des cartes de navigation pour les militaires et ont proposé de nouveaux symboles pour réduire la charge mentale lors de leur utilisation [211]. Ils ont formalisé une méthode de calcul de la surcharge mentale lors de l'utilisation des cartes aéronautiques. Dietzsch *et al.* ont listé les sources, les technologies et les produits relatifs à la cartographie aéronautique [81]. Leur étude de l'état de l'art montre que les clients principaux de la cartographie aéronautique sont maintenant les systèmes et que ce ne sont plus les humains qui sont majoritaires dans la manipulation et l'utilisation directe des cartes. Ils identifient que les couches

d'informations devront être mises à la disposition des clients pour leur exploitation en passant par le web, car les systèmes seront de plus en plus connectés, que le traitement et les informations devront être certifiés pour avoir une assurance du niveau de sécurité, et que la ligne de production des produits cartographiques destinés à l'aviation devra être plus rapide, avec des données plus précises et plus accessibles. Les travaux plus récents portent sur l'utilisation des cartes comme support aux activités aéronautiques comme l'utilisation d'une carte en 3D pour repérer et identifier les phénomènes météorologiques dangereux [258]. Dans le cadre de la gestion du trafic de drones, d'autres travaux portent sur la représentation des opérations des petits drones [44] ou la conception de nouvelles interactions afin d'intégrer les gros drones sur les écrans des contrôleurs aériens [101].

Du côté de la *production des données* pour les cartes, les drones peuvent être utilisés pour l'acquisition de données et pour la cartographie aérienne. Du côté de l'*exploitation des données*, la méthodologie SORA comporte de nombreuses références spatiales. En effet, le modèle sémantique de la méthodologie peut se représenter par un schéma indiquant la localisation des différents éléments - figure 2.3. La méthodologie nécessite d'identifier clairement les zones géographiques où les opérations doivent se dérouler, afin d'en tirer les éléments nécessaires à l'étude de risques : le volume de vol normal (*Flight Geography*) et les différentes zones tampons pour gérer les urgences.

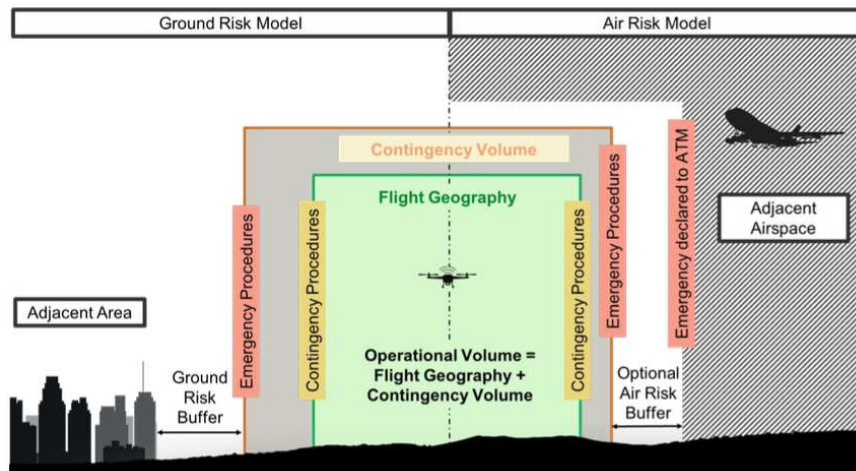


FIGURE 2.3 – Représentation graphique du modèle sémantique de SORA
Source : JARUS [104]

Les stations de contrôle de drones et les outils d'aide à la préparation de mission disponibles en ligne sont souvent à base de cartes - figure 2.4 .

Les représentations des futurs systèmes U-space et de gestion du trafic de drones, ou *Unmanned Traffic Management* (UTM), sont souvent basées sur des



FIGURE 2.4 – Capture d'écran de la station de contrôle au sol Paparazzi
Source : ENAC [114]

représentations spatiales. La figure 2.5 montre une vue en perspective isométrique de l'organisation des espaces aériens du U-Space [19]. Différentes interfaces humain-machine concernant la gestion du trafic de drones sont en cours de développement et sont également basées sur des cartes [30, 32, 183, 287]. Par exemple, la figure 2.6 montre l'utilisation d'une carte dans un système UTM pour le suivi de la mission et la visualisation des trajectoires pour un aéronef.

Toutefois, ces interfaces proposent un support inexistant ou limité pour la sécurité des opérations de drones en catégorie spécifique car aucune d'entre elles ne supporte la méthodologie SORA. L'application SAMWISE [149] propose de réaliser des SORA en ligne, mais uniquement avec une séquence de formulaires.

Comme les cartes sont utilisées à différents moments pour soutenir la sécurité d'une opération de drones, il est important d'en connaître les avantages ainsi que les différentes interactions existantes.

2.3 Cartes

Une carte est définie comme une *"représentation conventionnelle, généralement plane, de phénomènes concrets ou même abstraits, mais toujours localisables dans l'espace"*, selon le dictionnaire Larousse [165].

Vasiliev *et al.* [282] mettent en oeuvre plusieurs approches pour définir une carte, dont une synthèse de la définition issue de plusieurs domaines : *"une représentation de la surface géographique de la Terre."* Un cartogramme est un *"schéma cartographique sur lequel on a représenté des renseignements statis-*



FIGURE 2.5 – Illustrations des types de volumes d'espace aérien dans U-space
Source : EUROCONTROL [19]

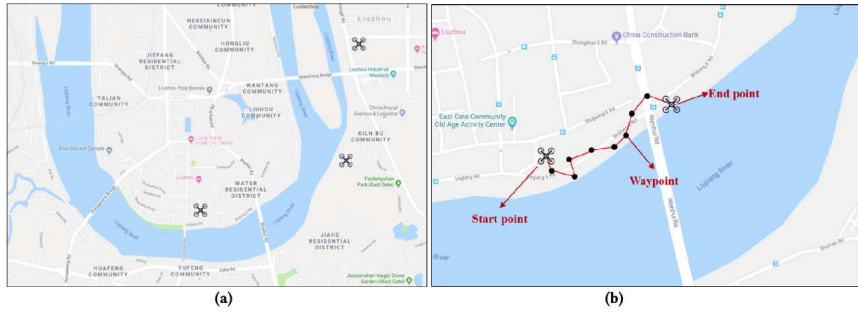


FIGURE 2.6 – Interfaces pour le suivi des drones (a) et la visualisation de trajectoires (b) dans un système UTM
Source : Wang *et al.* [287]

tiques" [165]. Les cartographes s'accordent pour dire qu'il n'est pas possible d'avoir une définition unique de ce qu'est une carte. Le terme "carte" possède différentes interprétations et de nombreuses représentations visuelles sont classées sous ce terme comme les images satellites, les cartogrammes, un fichier texte contenant des données géographiques, ... [182, 185, 282].

Dans ce manuscrit, le terme "*carte*", ou représentation cartographique, désigne toute représentation visuelle d'une partie de la Terre, sur laquelle d'autres informations qualitatives ou quantitatives pourront être placées et localisées, sans nécessairement exiger l'exactitude topographique.

2.3.1 Avantages des cartes

Une carte est un artefact cognitif. Un artefact cognitif aide l'Humain de deux façons : d'une part, en externalisant la mémoire afin de réduire la charge mentale et d'autre part, en facilitant les traitements ou calculs par l'externalisation des résultats intermédiaires [274]. Si les artefacts reproduisent ou sont cohérents avec la disposition spatiale naturelle ou intuitive (*natural mapping*) des éléments qu'ils représentent, les effets positifs sont multipliés. Cela correspond à l'utilisation de la *connaissance dans le monde* décrite par Don Norman [208]. Cette connaissance favorise la mémoire à long terme et facilite l'interprétation aux premiers abords sans nécessiter un apprentissage poussé.

Une carte est aussi une représentation visuelle. Les représentations visuelles font partie des plus anciennes formes de communication [273]. Parmi les différentes formes de communication, la représentation cartographique est plus permanente que la pensée ou la parole et demeure visible par toute la communauté [274]. En comparant différentes représentations visuelles, Lohse *et al.* ont mis en avant plusieurs qualités de la représentation cartographique par rapport aux représentations telles que les graphes, tableaux, tableaux graphiques, diagrammes temporels, réseaux, diagrammes de structure, diagrammes de processus, icônes et images [182]. Les cartes sont d'excellents outils pour montrer la spatialité des phénomènes et elles constituent la représentation visuelle la plus facile à comprendre. Elles permettent de montrer aussi bien des phénomènes discrets que continus. En plus d'être visuellement attractives, les représentations cartographiques peuvent transmettre une grande variété d'informations et en quantité importante [160].

En revanche, les cartes sont moins bonnes pour montrer la temporalité [182]. Elles nécessitent aussi de réduire les détails et de parfois de grouper les phénomènes [160]. Par exemple, passer d'une réalité en 3 dimensions à une représentation plane en 2 dimensions. De plus, l'usage de la *connaissance dans le monde* peut-être moins efficace si l'utilisateur est saturé par trop d'informations ou si elle respecte peu l'intuition naturelle et nécessite des efforts supplémentaires pour l'interprétation et l'usage [208]. Le processus de création d'une carte conduit à sélectionner et à mettre l'accent sur quelques aspects des phénomènes considérés et à négliger voire rendre invisible tout le reste, alors que la réalité demeure complexe et comporte d'innombrables détails. En conséquence, les cartes sont obligatoirement arbitraires et peuvent être biaisées [33, 160, 185].

Les représentations cartographiques peuvent servir à attirer l'attention et éveiller l'intérêt, modéliser des objets du monde, enregistrer de l'information, faciliter la mémorisation, transférer la connaissance, faciliter la découverte à partir des informations présentes ainsi que soutenir la réflexion, les déductions

et la prise de décision [164, 273]. Toutefois, la création de cartes est difficile. Seule une carte correctement conçue peut achever les fonctions listées précédemment. Rassembler des données peut être chronophage ainsi que de s'assurer de leur qualité : correctes spatialement et temporellement, niveaux de détails et de précision suffisants, degré de confiance dans la source, respect du droit d'auteur des données secondaires, etc. Ensuite, il faut produire les cartes, les vérifier, les corriger puis les reproduire en vue de leur distribution [160].

Il existe une grande diversité d'outils pour réaliser des cartes, allant du doigt qui permet de tracer à même le sol jusqu'aux systèmes d'informations géographiques (SIG) professionnels, en passant par les web maps. De la même façon, une carte peut être utilisée de différentes manières.

2.3.2 Utilisation des cartes

DiBiase propose un modèle conceptuel dans lequel l'utilisation des cartes se déplace entre deux extrêmes d'un continuum, allant de la pensée visuelle à la communication visuelle, dans le contexte de la recherche scientifique [79]. La pensée visuelle, ou facilitation graphique, permet d'accompagner les processus de compréhension, d'apprentissage, de création du monde qui nous entoure, à partir des éléments de langage visuels [82, 167].

En détaillant la figure 2.7, les buts le long du continuum *pensée visuelle* – *communication visuelle* peuvent être :

- l'exploration : manipuler et examiner des données spatiales dans le cadre d'une enquête, pour un usage privé du chercheur ou d'un groupe restreint. La qualité de l'aspect visuel étant moindre que celle nécessaire pour une diffusion publique.
- la confirmation : des questions se posent, des suppositions et des hypothèses sont faites. La carte est utilisée pour les confirmer ou les infirmer par combinaison ou transformation des données initiales, parfois avec l'aide d'autres outils visuels, des statistiques, de la modélisation, etc. Des motifs ou des anomalies peuvent être mis en évidence et exploités pour le raisonnement.
- la synthèse : regrouper les motifs et les relations découvertes précédemment en un tout cohérent. Il s'agit du moment où le concepteur de carte décide des détails à garder, de ceux à supprimer et sur lesquels insister.
- la présentation : communiquer les affirmations ou la vision à une plus large audience.

L'idée fondamentale de MacEachren est de schématiser les possibilités d'utilisation des cartes comme un cube - figure 2.8. Trois arêtes représentent 1) l'axe de l'usage - allant de la sphère privée à la diffusion publique, 2) l'axe du degré de connaissance de ce qui est montré - allant de présenter ce qui est déjà connu jusqu'à révéler certaines informations moins évidentes auparavant et en dernier lieu, 3) l'axe du niveau d'interactivité entre l'Humain et la carte - allant de forte, où l'utilisateur peut effectuer de nombreuses interactions pour modifier, ajouter et transformer la carte voire en changer jusqu'à celle plus faible où l'utilisateur

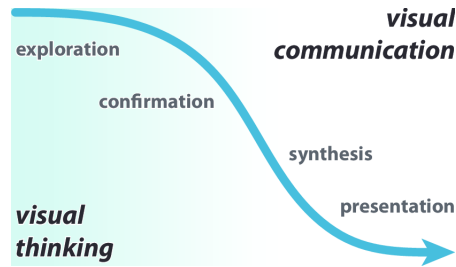


FIGURE 2.7 – Continuum de la pensée visuelle à la communication visuelle. À l'extrémité correspondant à la pensée visuelle, les cartes et autres visuels correspondent à des outils de réflexion et d'analyse tandis qu'à l'autre extrémité, correspondant à la communication visuelle, elles deviennent des supports de communication plus ou moins figés.

Source : DiBiase [79]

a peu de moyens de modifier la carte qui lui est présentée [186]. Par exemple, une carte géographique d'un pays affiché dans un endroit public pourrait ne servir qu'à la communication tandis que la même carte, chargée dans un système d'informations géographiques (SIG) avec les résultats de carottage pour la recherche de métaux précieux peut servir d'outil d'analyse pour décider des lieux où l'implantation de futures mines serait optimisée.

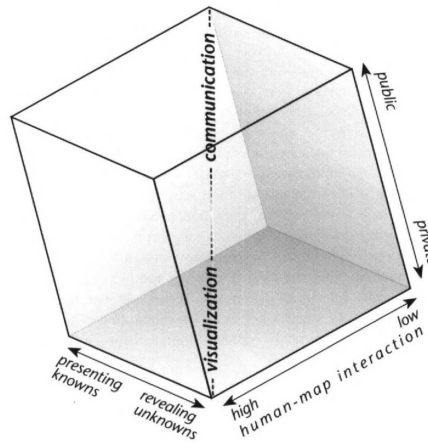


FIGURE 2.8 – Représentation de l'espace d'utilisation d'une carte, indépendamment du type de cartes

Source : MacEachren [186]

La dimension de l'interactivité est une composante identifiée de l'utilisation des cartes. Plus elle est importante, plus il est facile de raisonner sur une carte. Ainsi, il est utile de connaître les différentes interactions sur une carte.

2.3.3 Interactions possibles sur une carte

Il existe de nombreuses tentatives d’inventorier et classer les interactions possibles sur une carte. Roth propose trois approches pour classer les interactions, en se basant sur ces tentatives [235]. La première est basée sur l’*objectif* que l’utilisateur veut atteindre, par exemple identifier des éléments sur une carte ou les comparer entre eux. La deuxième approche est basée sur les *types d’opérations* disponibles. Parmi les plus communs on a la *sélection* ou *brushing* suivi d’un changement d’apparence ou de comportement comme feedback, le *focus* pour l’ajout ou la suppression de détails d’un élément ou d’une zone, et le *lien* qui coordonne l’interaction en cours avec d’autres vues. La troisième approche est basée sur les *opérandes* ou les types de données manipulées, par exemple des scalaires, des vecteurs ou d’autres structures plus complexes comme les tableaux.

De cette base, de nombreux chercheurs ont conçu des interactions pour des cas d’utilisation variés et pour différents domaines. Par exemple, une représentation spatiale des éléments d’intérêt ainsi que des interactions issues des cartes comme le zoom, le lien entre différentes vues, etc. ont été réutilisées pour faciliter l’utilisation d’un radio-télescope de plus de 60 antennes [217]. Xie *et al.* ont combiné une carte avec de l’*eye-tracking* pour exploiter une carte de métro [292]. D’autres interactions permettent par exemple d’analyser à posteriori les événements se passant pendant une partie de jeu vidéo [157], ou encore sont étendues à la visualisation de données en général, afin de décrire une catégorie de visualisations possédant les caractéristiques désirables d’une carte [134].

2.4 Résumé

Les cartes sont une représentation déjà bien adoptée dans l’aéronautique. Elles sont facilement compréhensibles et adaptables aux besoins de l’exploitation. Elles contribuent à la sécurité des opérations aériennes. Naturellement, la gestion du trafic de drones tire profit des avantages offerts par les cartes, tout comme la gestion du trafic aérien conventionnel auparavant, mais de manière encore plus exacerbée. En effet, la méthodologie SORA utilise beaucoup de références spatiales, et des interactions facilitant l’intégration des drones sont aussi basées sur des cartes.

Au vu de la diversité des systèmes de drones, des types d’opération possibles, des possibilités d’utilisation de cartes ou de leur absence, il est nécessaire d’organiser et de systématiser cet ensemble d’opérations avant de se lancer dans la conception d’un système permettant de faciliter les demandes d’autorisations d’opérations en catégorie spécifique. Des questions relatives au support à la sécurité des opérations se posent : sur quelles étapes de la mission portent les contributions pour soutenir la sécurité des opérations ? Pour quelles tâches servent-elles ? Quelles interactions sont disponibles ? Dans quelle mesure les cartes sont utilisées ? Quelles tâches et quelles interactions sont proposées ?

Chapitre 3

Revue systématique de la littérature

"If I have seen further, it is by standing on the shoulders of giants".

– Isaac Newton

"Progress cannot be generated when we are satisfied with existing situations".

– Taiichi Ohno

Caractériser les contributions déjà existantes en matière d'IHM pour la sécurité des opérations de drones est indispensable et la première étape pour répondre à notre question de recherche. Nous avons réalisé une Revue Systématique de la littérature (RSL) afin d'atteindre cet objectif.

Au sein de la communauté IHM et robotique, plusieurs états de l'art recensent des travaux qui visent à faciliter les missions impliquant l'opération de drones. De nombreuses facettes sont couvertes comme la conception de drones [57], l'optimisation de trajectoires [4], les aspects de vie privée ou de résistance aux attaques malveillantes [12], les interactions avec les drones pour du pilotage de loisir [265, 112], l'aide au contrôle d'essaims de drones [111], ou encore les outils et interactions disponibles pour les télépilotes pendant les phases de vol [216]. Cependant, aucun de ces états de l'art ne traite explicitement du support à la sécurité des missions de drones.

Du côté des approches systématiques, Alsammak *et al.* réalisent une RSL (n = 51) pour étudier l'application des drones à l'extinction des feux de forêts [11]. Ils ont identifié les lacunes sur le domaine ainsi que les perspectives pour la recherche. L'IHM est utilisée pour la planification des trajectoires mais ne concerne qu'un article. Cette recherche est typique de l'utilisation des drones pour soutenir la sécurité alors que notre intérêt est d'étudier le soutien à la sécurité des opérations de drones en général. Des revues systématiques synthétisant l'utilisation des drones pour soutenir la sécurité et recensant les lacunes

de recherche existent pour différents domaines comme l'aide humanitaire [305], la surveillance de trafic urbain [43], etc.

Toro *et al.* ont réalisé une RSL ($n = 33$) pour caractériser les possibilités pour l'IHM de soutenir les activités dans le domaine du transport [190]. Les techniques de conception d'interactions et d'interfaces, d'analyse et d'évaluation de celles-ci ainsi que la simulation sont utilisées pour résoudre les problèmes d'expérience utilisateur et de sécurité de l'utilisateur mais aussi pour évaluer les modèles d'affaires et le développement urbain. Cette RSL renforce l'utilité des IHM pour le bon fonctionnement des systèmes de transport. Toutefois, elle ne recense que deux publications concernant l'aviation et celles-ci ne traitent pas des drones.

Dans sa RSL ($n = 69$), Ozyoruk étudie l'impact des facteurs humains (FH) sur les opérations de drone [306]. Il classe les études en 4 grands groupes. En premier lieu, la familiarisation avec les concepts de base des FH comme la charge mentale, la conscience de la situation, la fatigue, la collaboration, ... ainsi que leur combinaison, leurs liens avec la sécurité et les situations d'urgence; en deuxième lieu, la conception et l'ergonomie des systèmes de drones, où il est question des affichages, des interfaces utilisateurs et des stations de contrôle; en troisième lieu, les membres d'équipage : leur sélection, leurs compétences, leur évaluation, leur entraînement et leur collaboration; enfin, les problèmes opérationnels où il est question des vols et des procédures. Il conclut que les facteurs humains sont critiques pour la sécurité des opérations mais que les études y ayant trait sont insuffisantes en terme de nombre et de profondeur. Il souligne en particulier les problèmes opérationnels comme l'organisation du calendrier des missions, la vérification de la conformité avec les procédures et la réglementation ainsi que la complexité intrinsèque aux missions avec plusieurs drones. Il souligne aussi que les études pour gérer ces problèmes de façon systématique sont presque inexistantes. Intégrer des solutions à ces problématiques dans les processus opérationnels peut réduire voire éliminer les effets des FH et améliorera l'efficacité, l'efficience et la sécurité des opérations [306].

En résumé, les IHM constituent un aspect vital pour la sécurité du système de transport aérien auquel l'aviation et les drones appartiennent. Cependant, il n'existe pas de RSL sur le soutien à la sécurité des drones, et en particulier sur les contributions des IHM à cette finalité. En plus de combler cette lacune, notre RSL servira de base pour orienter notre recherche.

3.1 Questions de recherche

Notre objectif est l'amélioration des Interactions Humain-Machine (IHM) afin de maximiser la sécurité lors des opérations de drones. Spécifiquement, par cette RSL, notre objectif est de caractériser le rôle et l'importance de l'IHM en tant que soutien de la sécurité dans la préparation des missions de drone. Par rapport aux connaissances actuelles, nos questions de recherche sont :

- RQ1 : Quels sont les types de missions qui bénéficient de soutien à la sécurité et ceux qui sont peu représentées ?

- RQ2 : Quelles sont les approches existantes du soutien à la sécurité des missions de drones ?
- RQ3 : Quelle est la proportion d'approches s'appuyant sur l'IHM ?
- RQ4 : Quelles sont les contributions du domaine de l'IHM dans les articles scientifiques traitant du soutien à la sécurité des missions de drones ?
- RQ5 : Quelle est la proportion de l'utilisation des cartes parmi ces contributions IHM ?
- RQ6 : Quelles sont les recommandations de conception issues de ces contributions IHM ?

3.2 Méthodologie

Cette section décrit le processus utilisé pour réaliser notre revue systématique de la littérature (RSL) et notre méthodologie d'analyse des résultats.

3.2.1 Réalisation

Un première itération a été réalisée avec les mots clés "safety", "human machine interaction", "drone" et "mission" pour essayer le processus. Le nombre de publications ayant remonté et filtré ayant été faible ($n = 32$), nous avons élargi la portée en gardant 2 mots clés pour la sécurité et les drones. Une deuxième RSL a été réalisée en juin 2020 ($n = 99$) et fait l'objet d'un article présenté à une conférence francophone [230]. Une troisième itération de la RSL a été effectuée en 2021 ($n = 123$), objet de ce chapitre. La recherche et la consolidation des documents à utiliser en entrée de la RSL décrite dans ce chapitre ont été réalisées les 25 et 26 mai 2021. La recherche s'est faite parmi les titres des publications, leurs résumés et leurs mots-clés. Nos essais préalables ont montré que la recherche avancée sur Google Scholar n'était pas assez spécifique, raison pour laquelle cette base n'a pas été retenue comme source primaire. Cela correspond à ce qu'indique l'état d'art sur les RSL qui conseille de n'utiliser Google Scholar que comme ressource additionnelle [128]. Les bases de données utilisées étaient Web Of Science (WoS) et la Digital Library de l'Association for Computing Machinery (DL ACM). DL ACM contient les références de 6 des 10 publications en Interactions Humain-Machine ayant un h5-index le plus élevé [245]. WoS est retenu car faisant partie des ressources électroniques accessibles par les auteurs. Elles permettent de rassembler les publications de nombreuses collections scientifiques notamment IEEE Xplore.

Les bases de données étant en anglais, les mots clés utilisés sont "safety" pour sécurité et "unmanned". En effet, la terminologie employée confond parfois UAS (Unmanned Aircraft System), c.-à-d. le système de drones, UAS (Unmanned Autonomous System) c.-à-d. le système de drones autonomes, et UAV (Unmanned Aerial Vehicle) c.-à-d. l'aéronef ; "unmanned" pourra donc couvrir ces cas de figure. De même, "unmanned" pourra aussi être remplacé par RPAS (Remotely Piloted Aircraft System) et drone.

Nous avons identifié 230 publications potentielles de DL ACM et 407 de

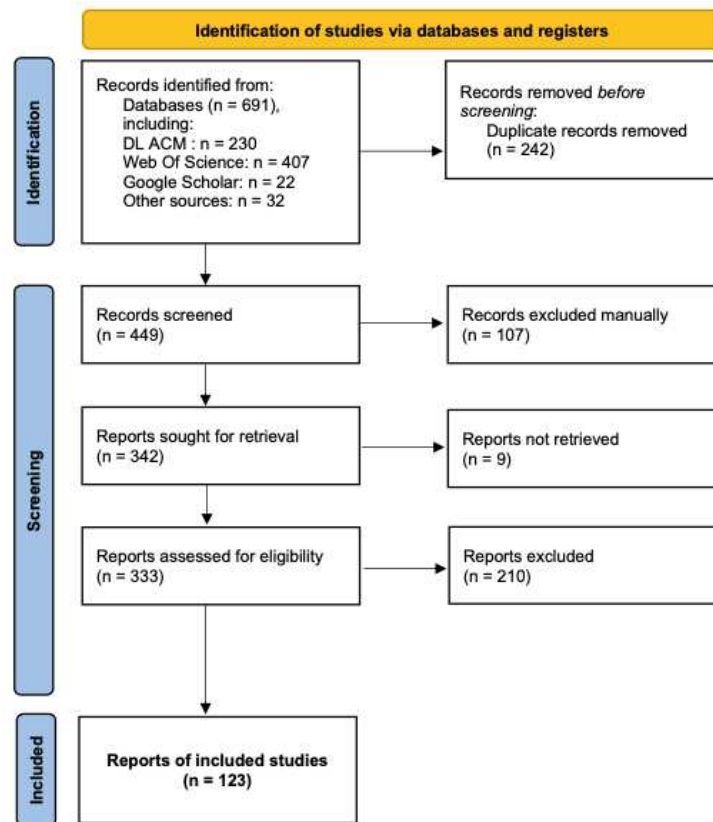


FIGURE 3.1 – Progression du filtrage des éléments qui seront utilisés dans la Revue Systématique de la Littérature (PRISMA 2020) - mots-clés : "Safety for Unmanned Aircraft System"

WoS. Le processus d'une RSL permet d'inclure des documents depuis d'autres sources, et nous avons ajouté 54 articles. Les 32 premiers sont issus de la première itération, la méthode permettant d'inclure des données pertinentes qui ne font pas nécessairement partie des bases de données sélectionnées [80]. Les 22 derniers sont issus de Google Scholar, pour lequel les 50 premiers résultats ont été filtrés manuellement par rapport aux critères d'exclusion. Au total 691 publications ont servi d'entrée à la RSL.

Critères d'exclusion des publications

Les critères d'exclusion sont une langue autre que l'anglais ou le français ; ne traite pas d'aéronautique ; types autres que chapitre de livre ou article ; publié avant 2014 ; texte intégral inaccessible ; pas de lien avec la sécurité des missions de drones ; application pour la sécurité en utilisant des drones. La figure 3.1 montre le déroulement et le résultat de la sélection des 691 articles retenus, selon la présentation standard préconisée par le *Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses* (PRISMA) [198].

Après avoir enlevé les doublons, nous avons ensuite appliqué les critères d'exclusion. Le filtrage a été effectué par l'auteur mais avec une vérification par un tiers, afin de minimiser les biais d'évaluation. A la fin, des 449 publications uniques en entrée, il restait 123 articles à analyser.

3.2.2 Analyse

Afin de permettre une analyse systématique et exhaustive de chacun des articles ($n = 123$), nous avons utilisé une variante de la méthode de questionnement [17]. Elle s'adapte à différentes problématiques et peut servir de garant pour le principe de reproductibilité [38]. Nous proposons ainsi la déclinaison des questions Qui, Quoi, Où, Quand, Combien, Comment et Pourquoi ou QQQQCCP pour analyser les articles relatifs à la sécurité pour le soutien aux missions de drones. La question "Pourquoi ?" n'est pas prise en compte car les publications retenues concernent toutes le soutien à la sécurité des missions de drones.

Afin de répondre à RQ1, nous utilisons les questions "Quoi ?" pour les types de drones impliqués et "Où ?" pour caractériser les lieux où se déroulent les opérations et si celles-ci se font hors-vue ou non.

Afin de répondre à RQ2 et RQ3, nous avons attribué une catégorie principale à chaque article pour la question "Comment ?", c'est-à-dire quelle est l'approche principale présentée dans chaque article. Les catégories finales ont été raffinées itérativement par deux personnes.

Afin de répondre à RQ4, nous avons aussi considéré les articles avec une composante IHM même si ce n'était pas la composante principale. Pour chacun de ces articles, nous avons attribué une catégorie d'approche issue de l'IHM telles que Interface Graphique, Performance de l'Humain, Visualisation de l'information ou Réalité Virtuelle. Les approches principales et les catégories IHM ont émergé en utilisant la Théorie Enracinée [260] sur les contributions identifiées.

Afin de répondre à RQ5, nous avons aussi vérifié si la contribution tirait profit d’une représentation spatiale ou cartographique.

Afin de répondre à RQ6, nous avons collecté, classé et synthétisé les recommandations de conception issues contributions IHM.

3.3 Résultats

Dans cette section, nous présentons un ensemble de perspectives concernant les recherches actuelles sur le soutien à la sécurité des missions de drones. Les résultats sont issus de l’analyse des publications retenues par notre RSL ($n = 123$). Ces résultats offrent des conclusions approfondies sur les cas d’études considérés (type de drones, phase de vol...) ainsi que sur les approches de recherches, notamment en IHM. Pour certaines questions comme “Qui ?” ou “Quoi ?”, certains articles couvrent plusieurs catégories. Lorsque c’est le cas, nous présentons les données sous plusieurs formes. Pour chaque réponse aux questions, nous donnons le nombre d’articles associés et le pourcentage sur l’ensemble des articles. Si les articles ont été associés à plusieurs réponses, nous traitons les données comme s’il s’agissait de questions à choix multiples et proposons un pourcentage sur le nombre d’articles mais également par rapport au nombre total de réponses. Pour les questions à choix multiples, nous utilisons le pourcentage par rapport au nombre total de réponses qui nous semble plus pertinent pour appréhender les proportions.

La figure 3.2 présente le nombre d’articles par année. Depuis 2015, la tendance est à l’augmentation. Le nombre d’articles est en baisse pour 2020. L’extraction des données ayant été effectuée en juin 2021, cela ne permet pas d’observer le phénomène pour 2021.

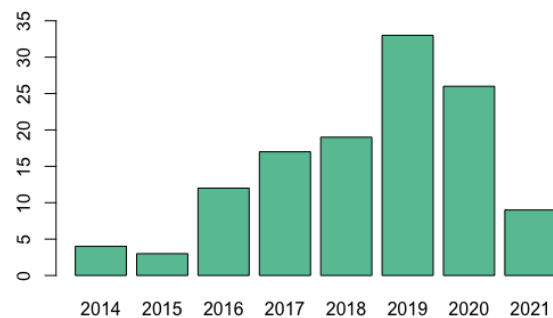


FIGURE 3.2 – Nombre d’articles par année depuis 2014

3.3.1 Cas d’études considérés

Cette sous-section contient les tableaux regroupant les résultats de l’application de la méthode de questionnaire.

TABLE 3.1 – Résultats pour *Qui ?* – Question Spécifique : les bénéficiaires des contributions des articles, en termes de proportion sur le nombre d’articles (Prop. d’art.) et de proportion sur le nombre de réponses (Prop. de rép.).

Réponses	Total	Références	Prop. d’art.	Prop. de rép.	Nbre de rép.
régulateur	9	[231, 13, 169, 116, 293, 22, 219, 27, 298]	7.32%	5.36%	168
prestataire de services de la navigation aérienne	33	[301, 24, 183, 44, 101, 286, 120, 10, 6, 250, 156, 131, 75, 70, 287, 73, 284, 46, 222, 32, 237, 293, 168, 18, 166, 132, 8, 220, 219, 304, 299, 27, 298]	26.83%	19.64%	
fabricant	17	[297, 127, 224, 275, 302, 202, 72, 231, 13, 169, 176, 54, 155, 163, 184, 52, 294]	13.82%	10.12%	
exploitant	30	[161, 39, 20, 177, 233, 201, 64, 10, 6, 250, 156, 131, 75, 70, 287, 73, 284, 46, 222, 32, 237, 293, 22, 8, 52, 219, 197, 27, 88, 298]	24.39%	17.86%	
pilote à distance	79	[234, 113, 254, 225, 87, 288, 215, 279, 62, 267, 67, 108, 65, 35, 86, 122, 188, 212, 107, 37, 175, 242, 28, 296, 281, 259, 55, 226, 290, 268, 289, 239, 303, 15, 203, 178, 173, 40, 154, 5, 26, 126, 30, 280, 98, 121, 214, 171, 77, 153, 241, 49, 176, 54, 168, 18, 166, 132, 22, 155, 163, 78, 8, 218, 304, 174, 106, 181, 294, 89, 291, 197, 299, 27, 133, 88, 295, 199, 298]	64.23%	47.02%	

Qui ?

Les bénéficiaires d’aide à la sécurité sont principalement les pilotes à distance (47.02%). Les prestataires de service de la navigation aérienne, incluant le contrôle aérien tel qu’il est connu actuellement et les futurs fournisseurs de service de l’UTM constituent 19.64% des articles, les exploitants 17.86% et les concepteurs-fabricants de drones 10.12%. Enfin, les régulateurs constituent 5.36% des articles.

Quoi ?

Les drones de moins de 25kg constituent 60.61% des articles, tandis que les plus gros constituent 25.76%. Le type de drones n’est pas mentionné pour 13.64%.

Les voilures tournantes, ce qui inclut les quadricoptères, constituent 49.28% des articles alors que les voilures fixes en constituent 30.43% et que 20.29% des articles ne mentionnent pas le genre de drones considérés. Le segment air

TABLE 3.2 – Résultats pour *Quoi ?* 1 sur 3 – Question Spécifique : la taille de l'aéronef

Réponses	Total	Références	Prop. d'art.	Prop. de rép.	Nbre de rép.
petit	80	[297, 127, 302, 169, 183, 44, 286, 161, 39, 20, 177, 233, 10, 131, 75, 70, 287, 284, 46, 222, 32, 293, 234, 113, 254, 288, 215, 267, 108, 65, 35, 122, 188, 212, 107, 37, 242, 296, 281, 259, 55, 226, 268, 15, 178, 173, 40, 154, 5, 26, 30, 98, 121, 214, 77, 153, 241, 49, 54, 168, 18, 166, 132, 22, 155, 163, 8, 218, 184, 52, 219, 304, 174, 106, 181, 294, 197, 27, 295, 298]	65.04%	60.61%	132
gros	34	[72, 171, 176, 224, 202, 120, 250, 231, 286, 64, 65, 301, 101, 279, 173, 280, 156, 237, 86, 24, 67, 203, 22, 163, 78, 8, 218, 184, 219, 89, 299, 133, 88, 199]	27.64%	25.76%	
non mentionné	18	[224, 202, 72, 231, 301, 24, 101, 286, 120, 64, 250, 156, 237, 279, 67, 65, 86, 203, 173, 280, 171, 176, 22, 163, 78, 8, 218, 184, 219, 89, 299, 133, 88, 199]	14.63%	13.64%	

constitue 53.15% des articles, le segment sol constitue 38.46% des articles et le segment des communications 8.39%.

Où ?

Si l'espace aérien non-contrôlé au-dessus du Very Low Level (VLL) constitue 1.52% des articles, l'espace à très basse altitude en constitue 50.76%. 21.97% des articles sont concernés par l'espace aérien contrôlé, qui inclut les aéroports alors que 25.76% ne mentionnent pas les caractéristiques de l'espace aérien où leurs opérations ont lieu. Les missions en BVLOS constituent 73.13% des articles, celles en VLOS 11.94% et 14.93% ne mentionnent pas le type de mission. L'applicabilité aux missions à longue élévation est possible pour 83.74% des articles mais 8.94% ne le mentionnent pas. L'intégration des drones et du trafic aérien avec pilotes à bord constitue 21.95% des articles par le biais de tests, simulation ou démonstration et 72.36% ne s'en préoccupent pas. Six articles ne le mentionnent pas (5.69%).

Quand ?

La phase de vol constitue 71.01% des articles. La phase de préparation de celle-ci constitue 18.12%. Deux articles concernent l'après vol (1.45%), trois articles la réglementation (2.17%), cinq articles la demande d'autorisation (3.62%) et cinq articles la fabrication des drones (3.62%).

TABLE 3.3 – Résultats pour *Quoi ?* 2 sur 3 – Question Spécifique : le type d’aéronef considéré

Réponses	Total	Références	Prop. d’art.	Prop. de rép.	Nbre de rép.
voilure fixe	42	[202, 72, 301, 24, 101, 120, 161, 64, 250, 156, 70, 287, 222, 237, 279, 67, 65, 86, 203, 178, 173, 280, 171, 176, 22, 163, 78, 8, 218, 184, 52, 219, 294, 89, 291, 197, 299, 27, 133, 88, 199, 298]	34.15%	30.43%	138
voilure tournante	68	[297, 127, 224, 302, 169, 39, 20, 177, 233, 131, 287, 284, 46, 222, 293, 234, 113, 254, 288, 215, 267, 108, 35, 122, 188, 212, 107, 242, 296, 281, 55, 15, 178, 173, 40, 154, 5, 26, 30, 280, 98, 121, 214, 77, 153, 241, 49, 54, 168, 18, 166, 132, 22, 155, 163, 8, 218, 184, 52, 219, 304, 174, 106, 181, 294, 27, 295, 298]	55.28%	49.28%	
non mentionné	28	[275, 231, 13, 183, 44, 286, 201, 10, 6, 75, 73, 32, 116, 225, 87, 62, 37, 175, 28, 259, 226, 290, 268, 289, 239, 303, 126, 220]	22.76%	20.29%	

Combien ?

Les vols en solo constituent 53.66% des articles, les essais de drones 12.20% et plusieurs drones partageant le même espace en constituent 34.15%.

3.3.2 RQ1 : Quels sont les types de missions qui bénéficient de soutien à la sécurité et celles qui sont peu représentées ?

Le type de drones qui bénéficie le plus du soutien à la sécurité est celui des petits drones, avec 60.61% des réponses. Le moins représenté est celui des gros drones - Tableau 3.2.

Les voilures tournantes, incluant les multicoptères, les hélicoptères et les hybrides font partie des plus étudiés avec 55.28% des réponses - Tableau 3.3.

Le segment le plus étudié est le segment *air*, avec 61.79% des réponses. Le moins étudié est celui des communications avec 8.39% des réponses - Tableau 3.4.

Le VLL est l’espace aérien dans lequel les drones étudiés évoluent le plus avec 50.76% des réponses. L’espace aérien au-dessus du VLL mais non contrôlé est celui qui est le moins étudié avec 1.52% des réponses - Tableau 3.5.

Le type d’exploitation le plus étudié est en hors-vue ou BVLOS, avec 73.13%

TABLE 3.4 – Résultats pour *Quoi ?* 3 sur 3 – Question spécifique : le segment du système

Réponses	Total	Références	Prop. d'art.	Prop. de rép.	Nbre de rép.
air	76	[297, 224, 275, 302, 202, 231, 13, 286, 120, 20, 177, 64, 250, 131, 284, 116, 293, 113, 225, 87, 288, 215, 279, 62, 67, 108, 65, 35, 86, 122, 188, 212, 107, 242, 28, 296, 259, 226, 289, 239, 303, 15, 178, 40, 154, 26, 126, 280, 98, 171, 77, 153, 49, 176, 54, 132, 22, 155, 163, 78, 8, 184, 52, 219, 304, 174, 181, 294, 89, 291, 197, 299, 27, 88, 295, 298]	61.79%	53.15%	143
communications	12	[127, 302, 13, 39, 233, 64, 284, 116, 254, 281, 268, 22]	9.76%	8.39%	
sol	55	[302, 72, 13, 169, 301, 24, 183, 44, 101, 161, 201, 64, 10, 6, 156, 75, 70, 287, 73, 284, 46, 222, 32, 237, 116, 234, 267, 37, 175, 55, 290, 203, 173, 5, 30, 121, 214, 241, 168, 18, 166, 22, 155, 163, 8, 218, 184, 220, 219, 174, 106, 89, 133, 199, 298]	44.72%	38.46%	

des réponses - Tableau 3.6.

Les contributions, détaillées à la sous-section suivante, sont applicables aux opérations à grande élongation (OGE) pour 83.74% des réponses - Tableau 3.7.

Les opérations de drones étudiés concernent en majorité des drones qui ne sont pas encore intégrés au trafic aérien avec pilotes à bord, avec 73.26% des réponses - Tableau 3.8.

L'étape de l'opération la plus étudiée est celle du vol avec 71.01% des réponses. Les moins étudiées sont l'après-vol, la demande d'autorisation, la réglementation et la fabrication du drone - Tableau 3.9.

Plus de la moitié des articles ne concernent qu'un seul drone, avec 53.66% des réponses - Tableau 3.10.

3.3.3 RQ2 : Quelles sont les approches existantes du soutien à la sécurité des missions de drones ?

Huit approches principales pour soutenir la sécurité des opérations de drones ont émergé de l'analyse des articles. Le tableau 3.11 liste les approches, les publications concernées et le pourcentage par rapport au total.

La préservation de l'intégrité de l'aéronef constitue 13.82% des articles. Les thèmes sont principalement les systèmes embarqués dont les systèmes de commandes en vol [54], notamment la détection de défaillances [39, 225, 35,

TABLE 3.5 – Question *Où ?* 1 sur 4 – Question spécifique : les caractéristiques de l'espace aérien où se passe la mission

Réponses	Total	Références	Prop. d'art.	Prop. de rép.	Nbre de rép.
non contrôlé	2	[67, 176]	1.63%	1,52%	132
contrôlé	29	[202, 231, 301, 24, 101, 286, 120, 161, 64, 250, 156, 73, 116, 279, 62, 86, 173, 18, 163, 78, 8, 184, 220, 219, 181, 89, 133, 199, 298]	23.58%	21.97%	
très basse altitude	67	[127, 275, 302, 13, 169, 183, 44, 286, 20, 177, 233, 201, 10, 131, 75, 70, 287, 73, 284, 46, 222, 32, 293, 254, 87, 215, 279, 108, 65, 35, 122, 188, 212, 37, 175, 242, 296, 281, 259, 290, 268, 289, 178, 154, 5, 26, 30, 280, 98, 121, 77, 153, 241, 49, 54, 168, 166, 132, 22, 163, 8, 184, 220, 219, 304, 106, 181]	54.47%	50.76%	
non mentionné	34	[275, 169, 183, 44, 201, 10, 70, 287, 284, 222, 32, 293, 296, 281, 259, 173, 5, 153, 49, 22, 155, 218, 52, 174, 294, 291, 197, 299, 27, 88, 295]	27.64%	25.76%	

224, 239, 40, 126], la gestion des contingences [279], la conception de systèmes résilients [297, 280], les aides pour l'atterrissage [113, 288, 215, 242, 281, 49] et la gestion des batteries [155].

La **cyber-sécurité** constitue 6.50% des réponses. L'enjeu est de protéger le système contre les attaques. Il s'agit de revues de la littérature [127, 13, 302], du cryptage des communications [254, 55, 268], de la vérification de l'authenticité des signaux ADS-B à partir de leur direction et de la position indiquée [163] et d'une proposition d'architecture de systèmes sécurisés [233].

"**Détecter et Éviter**" représente 18.70% des articles. Cette approche comprend la détection d'obstacles ou d'intrus dans une certaine zone de sécurité autour de l'aéronef en vol et selon le système, l'évitement automatique de collisions si nécessaire en plus de l'alerte. Les articles consistent en des revues de littérature où le sujet est traité [231, 275, 202], des améliorations d'algorithmes [87, 62, 67, 301, 86, 122, 188, 212, 177, 226, 289, 303, 15, 26, 132, 304, 299] ainsi que des systèmes (matériel et logiciel) fournissant la fonctionnalité de Détecter et Éviter [176, 98, 78].

Le **géorepérage** ou *geofencing* constitue 3.25% des réponses. La réglementation [59] la définit comme une fonction qui, sur la base des données fournies par le régulateur, détecte une violation potentielle des limites de l'espace aérien et en alerte les télépilotes, afin que ces derniers puissent agir de manière immédiate et efficace pour éviter cette violation. Des zones géographiques dans lesquelles l'aéronef doit évoluer (*keep-in*) ou qu'il doit éviter (*keep-out*) sont défi-

TABLE 3.6 – Question *Où ?* 2 sur 4 – Question spécifique : le type d’opérations

Réponses	Total	Références	Prop. d’art.	Prop. de rép.	Nbre de rép.
VLOS	16	[302, 169, 286, 73, 237, 293, 234, 254, 55, 178, 30, 22, 155, 163, 181, 27]	13.01%	11.94%	134
BVLOS	98	[297, 127, 202, 231, 169, 301, 24, 183, 44, 101, 286, 120, 161, 20, 177, 201, 64, 10, 250, 156, 131, 75, 70, 287, 73, 284, 46, 222, 32, 116, 293, 234, 113, 87, 288, 215, 279, 62, 267, 67, 108, 65, 35, 86, 122, 188, 212, 107, 37, 175, 242, 28, 296, 281, 259, 55, 15, 203, 178, 173, 5, 26, 280, 98, 121, 171, 77, 153, 241, 49, 176, 54, 168, 18, 166, 132, 22, 155, 163, 78, 8, 218, 184, 220, 219, 304, 174, 106, 294, 89, 291, 299, 27, 133, 88, 295, 199, 298]	79.67%	73.13%	
non mentionné	20	[224, 275, 72, 13, 39, 233, 6, 225, 226, 290, 268, 289, 239, 303, 40, 154, 126, 214, 52, 197]	16.26%	14.93%	

nies. Plusieurs algorithmes sont proposés par [107, 259] tandis que [131] propose la mise en oeuvre d’une zone d’interdiction de vol (NFZ). [8] étudie la façon la plus rapide de sortir d’une NFZ.

La catégorie des articles dont l’approche principale se base sur les **interactions humain-machine et les performances de l’humain (IHM/HP)** correspond à 20.33% du total des articles, soit 25 articles sur 123. Une revue de littérature sur les facteurs humains relatifs aux opérations de drones est proposée [18]. Des travaux définissent des métriques pour la mesure des performances des télépilotes ou évaluent la charge mentale de travail pour les contrôleurs gérant du trafic impliquant des drones [234, 24, 218]. L’amélioration des aides au pilotage et à la préparation de missions est aussi étudiée pour mieux identifier les pistes d’atterrissage par mauvaise visibilité [203], changer le point de vue du pilote pour faciliter les opérations dans les environnements complexes en 3D [267], utiliser plusieurs drones lors de mission de sauvetage [5], planifier des trajectoires en 3D [290] et en réalité virtuelle [214] ou communiquer, vérifier et valider les objectifs de mission de drones autonomes [237]. Les interfaces adaptatives pour le pilotage sont l’objet des travaux de [37, 156, 175, 173, 174]. Pour la surveillance, on trouve des outils pour l’identification et le suivi des aéronefs [168, 166, 106] ou des images-radar pour les contrôleurs afin d’intégrer les drones au trafic aérien [101] ou en milieu urbain [44, 220]. Un framework pour décrire et analyser les épisodes d’interaction critiques entre les opérateurs humains et les agents automatisés et/ou le contrôle manuel est proposé dans [184]. [133] propose une méthodologie de conception des stations de contrôle au sol. Des

TABLE 3.7 – Question *Où ?* 3 sur 4 – Question spécifique : est-ce applicable à la longue élévation ?

Réponses	Total	Références	Prop. d'art.	Nbre de rép.
oui	103	[297, 127, 224, 275, 302, 202, 72, 231, 13, 169, 301, 24, 183, 44, 101, 286, 120, 161, 20, 233, 201, 64, 10, 250, 156, 75, 70, 287, 73, 284, 46, 222, 32, 237, 116, 293, 234, 113, 254, 288, 215, 279, 62, 67, 108, 65, 35, 86, 122, 188, 212, 107, 37, 175, 28, 296, 281, 259, 55, 226, 268, 178, 173, 40, 154, 5, 280, 98, 121, 214, 171, 77, 153, 241, 49, 176, 54, 168, 18, 166, 132, 155, 163, 78, 8, 218, 184, 220, 219, 304, 174, 106, 294, 89, 291, 197, 299, 27, 133, 88, 295, 199, 298]	83.74%	123
non	9	[177, 131, 267, 242, 15, 203, 30, 52, 181]	7.32%	
non mentionné	11	[39, 6, 225, 87, 290, 289, 239, 303, 26, 126, 22]	8.94%	

recommandations de design qui intègrent la pratique des pilotes de drones professionnels sont données par [181]. Les fonctionnalités pour l'affichage optimal pour une fonction de Detect-And-Avoid sont données par [199].

La **planification de trajectoires**, représente 14.63% des approches. La plupart des articles propose ou améliore des algorithmes de calcul de trajectoires avant la mission [108, 242, 296, 178, 154, 121] ou de replanification en ligne [65, 28, 171, 77, 89, 291, 88, 295]. Les paramètres opérationnels de la mission sont pris en compte dans [20] puis des comparaisons sont réalisées par simulation. Les auteurs de [52] proposent d'améliorer la précision de la navigation en utilisant des marqueurs visuels. La navigation en cas de panne du GPS est étudiée dans [294].

Les méthodes d'**études de sécurité** représentent 13.82% des approches. Il s'agit de moyens pour évaluer les risques avant la construction des drones [169] et des systèmes [250], ou avant les opérations [10, 197] avec des cartes de risques au sol en cas d'impact [161, 70, 222] ou encore des méthodes formelles pour prédire la résilience des systèmes [201]. Ces méthodes concernent aussi l'exécution des opérations avec un système de recommandation utilisant les méthodes formelles [120]. Des outils pour générer automatiquement des dossiers de sécurité sont proposés [75, 73, 72] ainsi que des moyens d'identifier les changements entre plusieurs versions. La méthode SORA est appliquée à un contexte de production multimédia mult drone [46]. Vierhauser *et al.* [284] proposent une méthodologie comprenant la définition de dossiers de sécurité pour les espaces aériens d'une part et des exigences et des contraintes pour les drones demandant à y évoluer d'autre part. Des moyens de vérification et validation entre les deux jeux de contraintes sont mis en oeuvre avant la mission puis pendant sa réalisation. Belcastro *et al.* [27] proposent une méthode pour identifier les risques des futures

TABLE 3.8 – Question *Où ?* 4 sur 4 – Question spécifique : les drones sont-ils intégrés au trafic aérien ?

Réponses	Total	Références	Prop. d'art.	Nbre de rép.
oui	27	[202, 231, 301, 24, 101, 286, 120, 161, 64, 10, 250, 156, 75, 70, 116, 87, 86, 259, 173, 176, 168, 18, 166, 163, 8, 219, 133]	21.95%	123
non	89	[297, 224, 275, 302, 72, 13, 169, 183, 44, 39, 20, 177, 233, 201, 131, 287, 73, 284, 46, 222, 32, 237, 293, 234, 113, 254, 288, 215, 279, 62, 267, 67, 108, 65, 35, 122, 188, 212, 107, 37, 175, 242, 28, 296, 281, 55, 226, 290, 268, 289, 15, 203, 178, 40, 154, 5, 26, 30, 280, 98, 121, 214, 171, 77, 153, 241, 49, 54, 132, 22, 155, 78, 218, 184, 220, 52, 304, 174, 106, 181, 294, 89, 291, 197, 299, 27, 88, 295, 298]	72.36%	
non mentionné	7	[127, 6, 225, 239, 303, 126, 199]	5.69%	

applications de drones. Une méthode pour la vérification du contrôleur de vol d'un aéronef autonome selon la politique de navigation est proposée par Miraglia et Hook [197]. Young *et al.* proposent un modèle conceptuel pour l'assurance de la sécurité pendant l'opération d'un aéronef autonome [298].

La catégorie **gestion du trafic de drones** ou UTM, représente 8.94% des réponses. On trouve une revue de la littérature des régulations et technologies pour le vol urbain [293] ainsi que des suggestions pour les futurs systèmes et services [116, 183, 22]. Plusieurs travaux concernent des outils et concepts pour la planification de missions et le monitoring [287, 30, 64, 32, 241]. Certains permettent de simuler la gestion du trafic aérien pour tester et expérimenter [286, 287, 30, 48]. Un nouveau modèle de séparation de l'espace aérien dans les 3 dimensions et selon les performances des drones est proposé par [219].

3.3.4 RQ3 : Quelle est la proportion d'approches s'appuyant sur l'IHM ?

Le soutien à la sécurité des opérations de drones qui se base sur les interactions humain-machine ainsi que les performances de l'humain concerne 25 articles sur les 123. Cela correspond à 20.33% du total des articles, soit approximativement un article sur cinq - Tableau 3.11 .

TABLE 3.9 – Questions *Quand ?* – Question spécifique : étapes de la mission

Réponses	Total	Références	Prop. d'art.	Prop. de rép.	Nbre de rép.
réglementation	3	[116, 22, 219]	2.44%	2.17%	137
fabrication du drone	5	[202, 72, 6, 280, 98]	4.07%	3.62%	
préparation de la mission	25	[161, 201, 64, 10, 6, 287, 73, 284, 46, 222, 32, 237, 293, 30, 121, 214, 171, 77, 153, 241, 132, 197, 27, 88, 298]	20.33%	18.12%	
demande d'autorisation	5	[75, 70, 73, 219, 181]	4.07%	3.62%	
vol	98	[297, 127, 224, 275, 302, 231, 13, 169, 301, 24, 183, 44, 101, 286, 120, 20, 177, 233, 64, 250, 156, 131, 287, 284, 293, 234, 113, 254, 225, 87, 288, 215, 279, 62, 267, 67, 108, 65, 35, 86, 122, 188, 212, 107, 37, 175, 242, 28, 296, 281, 259, 55, 226, 290, 268, 289, 239, 303, 15, 203, 178, 173, 40, 154, 5, 26, 126, 30, 280, 49, 176, 54, 168, 18, 166, 132, 155, 163, 78, 8, 218, 184, 220, 52, 219, 304, 174, 106, 181, 294, 89, 291, 299, 133, 88, 295, 199, 298]	79.67%	71.01%	
après vol	2	[39, 298]	1.63%	1.45%	

3.3.5 RQ4 : Quelles sont les contributions du domaine de l'IHM dans les articles scientifiques traitant du soutien à la sécurité des missions de drones ?

Afin de répondre à RQ4, nous avons centré notre analyse sur les vingt cinq articles dont l'approche principale est IHM/HP, traités précédemment, ainsi que sur douze autres articles qui mentionnaient ou décrivaient des contributions IHM [6, 8, 30, 32, 62, 73, 75, 155, 176, 183, 287].

Pour chacun de ces trente sept articles, nous avons identifié une catégorie principale ainsi que les tâches des utilisateurs. La mention de l'utilisation de représentations géographiques a été déterminée. Nous avons également étudié les recommandations proposées pour la conception de systèmes et de missions de drone sûrs, ainsi que les perspectives de recherche suggérées.

Catégories IHM

La table 3.12 présente le nombre d'articles pour chacune des catégories identifiées. Les catégories *interface graphique* (43.24%) et *visualisation d'information* (29.73%) sont les deux catégories les plus représentées. Selon le Computer

TABLE 3.10 – Question *Combien ?* – Question spécifique : nombre de drones impliqués dans l'opération

Réponses	Total	Références	Prop. d'art.	Nbre de rép.
un seul	66	[297, 127, 224, 302, 72, 13, 169, 120, 161, 39, 20, 177, 201, 64, 10, 70, 73, 222, 32, 113, 254, 225, 288, 215, 279, 267, 65, 35, 86, 212, 107, 242, 296, 281, 259, 55, 239, 303, 203, 178, 40, 126, 30, 280, 98, 121, 214, 171, 77, 153, 49, 54, 168, 166, 22, 155, 52, 181, 294, 89, 291, 197, 133, 88, 295, 298]	53.66%	123
en essaim	15	[233, 237, 108, 226, 290, 268, 289, 15, 173, 154, 5, 26, 241, 218, 174]	12.20%	
plusieurs drones	42	[275, 202, 231, 301, 24, 183, 44, 101, 286, 6, 250, 156, 131, 75, 287, 284, 46, 116, 293, 234, 87, 62, 67, 122, 188, 37, 175, 28, 176, 18, 132, 163, 78, 8, 184, 220, 219, 304, 106, 299, 27, 199]	31.31%	

Science Handbook, une interface graphique (GUI) est "un programme interactif qui utilise un affichage graphique et des dispositifs d'entrée" [272]. Selon Vidal, l'objectif de la visualisation d'information (VIS) est "représenter dans un espace physique sous la forme de graphiques une information souvent abstraite et de fournir à l'utilisateur une compréhension qualitative du contenu de l'information" [283]. La différence entre les deux catégories est mince. Elle tient principalement à la possibilité pour les utilisateurs d'agir sur le système pour modifier les éléments constituant l'objet d'étude pour GUI alors que VIS n'agit que sur comment il serait présenté. Par exemple, alors qu'une GUI pour l'étude de sécurité ou le plan de vol permettrait de changer directement les zones ou les points d'intérêts ou d'annoter, la VIS permettrait seulement de changer la façon dont ces zones ou points sont affichés. Pour les interfaces graphiques, il s'agit majoritairement d'outils permettant de créer une mission en plaçant des points sur une carte, et de visualisations de type image radar pour surveiller le bon déroulement de la mission. Pour les interfaces graphiques, on trouve également des éditeurs servant à l'analyse de sécurité. Pour la visualisation d'information, il y a aussi l'affichage des instruments de vol, comme des systèmes d'évitement de collision en vol entre aéronefs. La catégorie *performance de l'humain* (22.62%) est la partie qui prend en compte la dimension des facteurs humains, en complément de la dimension plus orientée technique des autres catégories. Elle comprend plusieurs travaux visant à la mesure de performance des pilotes ou des contrôleurs afin d'adapter les interfaces graphiques à leur charge mentale. Certaines approches utilisent des modèles de charge mentale en fonction des phases de vol de la mission pour proposer des adaptations. Selon Socke et al., les facteurs humains étudient le "fonctionnement cognitif humain, la genèse

TABLE 3.11 – Répartition des approches principales pour le soutien à la sécurité des opérations de drones.

Approche principale	Nombre d'articles	Pourcentage	Références
Intégrité de l'aéronef	17	13.82%	[39, 113, 225, 288, 215, 279, 297, 35, 54, 281, 224, 239, 40, 126, 280, 49, 155]
Cyber-sécurité	8	6.50%	[302, 55, 127, 13, 233, 268, 302, 163]
Détecter et éviter	23	18.70%	[87, 62, 67, 301, 231, 86, 122, 188, 176, 212, 177, 275, 226, 289, 303, 15, 26, 202, 132, 98, 78, 304, 299]
Géorepérage	4	3.25%	[107, 259, 131, 8]
Interaction Humain-Machine et performances de l'humain	25	20.33%	[234, 267, 24, 37, 156, 175, 44, 166, 101, 18, 168, 290, 203, 173, 5, 214, 237, 218, 184, 220, 174, 106, 181, 133, 199]
Planification de trajectoires	18	14.63%	[108, 65, 242, 28, 20, 296, 296, 178, 154, 121, 171, 77, 153, 52, 294, 89, 291, 88, 295]
Etudes de sécurité	17	13.82%	[161, 10, 6, 250, 169, 120, 75, 70, 201, 73, 73, 72, 284, 46, 222, 197, 27, 298]
Gestion du trafic de drones	11	8.94%	[116, 183, 286, 287, 30, 64, 32, 241, 293, 22, 219]

de l'erreur, les conséquences possibles, les moyens qui permettent d'en diminuer la probabilité de survenue et ceux qui atténuent leur conséquence, dans le but d'améliorer la sécurité des systèmes dans lesquels l'homme évolue" [257]. Enfin, la catégorie *réalité virtuelle* (5.41%) comprend deux articles traitant de techniques de réalité virtuelle pour le pilotage et la préparation de mission. Selon Fuchs, la réalité virtuelle (VR) exploite "l'informatique et les interfaces comportementales en vue de simuler dans un monde virtuel le comportement d'entités 3D, qui sont en interaction en temps réel entre elles et avec un ou des utilisateurs en immersion pseudo-naturelle par l'intermédiaire de canaux sensori-moteurs" [109].

Tâches utilisateur

Nous avons identifié six tâches soutenues par des approches IHM/FH. La répartition de ces tâches pour les 37 articles est présentée dans la table 3.13.

La *surveillance* (38.89%) consiste à s'assurer que la mission se déroule dans des conditions nominales. Plusieurs travaux proposent des visualisations sous forme d'image radar ou d'instruments de vols alors que d'autres ajoutent des

TABLE 3.12 – Répartition des catégories IHM/FH principales

Catégories	Nombre d'articles	Pourcentage	Références
Interface Graphique (GUI)	16	43.24%	[101, 173, 5, 237, 6, 75, 73, 183, 287, 30, 32, 8, 174, 106, 133, 199]
Performances de l'Humain (HP)	8	22.62%	[234, 24, 156, 175, 18, 218, 184, 181]
Visualisation d'information (VIS)	11	29.73%	[62, 176, 37, 44, 166, 168, 290, 203, 222, 155, 220]
Réalité Virtuelle (VR)	2	5.41%	[267, 214]

représentations dédiées à la sécurité des vols comme les alertes en cas d'intrusion dans une zone interdite. Le *pilotage* (29.63%) est facilité par des techniques d'interaction ou par des interfaces graphiques qui permettent aux utilisateurs de saisir des valeurs de vitesse ou des points géographiques à atteindre sur une carte. Les approches d'adaptation dynamique à partir de mesures de l'état cognitif du pilote ou du déroulement de la mission visent également à rendre le pilotage plus performant. La *préparation de mission* (11.11%) consiste à définir les points d'intérêts sur une carte ou à planifier les déplacements du ou des drones avec des algorithmes pour assurer des trajectoires optimales. Le *contrôle* (11.11%) consiste à aider les utilisateurs à assurer une séparation suffisante entre les drones et/ou les avions en gérant leurs altitudes, trajectoires et vitesses. L'*étude de sécurité* (7.41%) consiste à exprimer, souvent de façon formelle, la mission avant son déroulement pour identifier les risques et les contre-mesures nécessaires. Enfin, la *demande d'autorisation* (1.85%) est la soumission d'un plan ou d'une intention de vol à une autorité pour qu'elle puisse effectuer des vérifications avant de valider l'opération.

3.3.6 RQ5 : Quelle est l'utilisation des cartes parmi ces contributions IHM ?

Nous avons analysé la présence de représentations géographiques, c'est-à-dire une représentation spatiale liée au contexte de la mission. Les résultats de cette répartition en fonction des tâches est donnée dans la table 3.14.

Les tâches de "pilotage", "préparation de mission", "surveillance" et "demande d'autorisation" sont principalement basées sur des représentations géographiques ($\geq 75.00\%$). On observe certains cas non précisés mais aucun cas de représentation non basée sur la géographie pour ces tâches, sauf pour le pilotage pour

TABLE 3.13 – Répartition des tâches utilisateurs (54 réponses au total).

Tâches	Nombre de réponses	Réf.	Pourcentage de réponses par nombre d'articles	Pourcentage de réponses par nombre de réponses
Demande d'autorisation	1	[32]	2.70%	1.85%
Contrôle	6	[8, 24, 156, 101, 18, 183]	16.22%	11.11%
Préparation de mission	6	[214, 222, 237, 287, 30, 32]	16.22%	11.11%
Surveillance	21	[62, 176, 8, 24, 37, 156, 175, 44, 168, 18, 166, 290, 173, 5, 237, 184, 220, 106, 183, 287, 30]	56.76%	38.89%
Pilotage	16	[181, 155, 8, 234, 267, 166, 168, 203, 173, 5, 218, 184, 174, 106, 133, 199]	43.24%	29.63%
Etude de sécurité	4	[6, 75, 73, 222]	10.81%	7.41%

18.75% des cas. Pour la tâche de contrôle, certains articles ne précisent pas les représentations envisagées (50 %) mais cette activité est fréquemment basée sur une image radar et aucun article ne décrit de représentation non basée sur une représentation cartographique. Pour la tâche "étude de sécurité", un seul article [222] présente une représentation géographique, avec une visualisation des risques au sol affichée sur une carte. Les trois autres articles sont basés sur d'autres représentations comme des diagrammes [75], des graphes [73] ou des arbres [6].

Les tâches de pilotage, surveillance et contrôle font partie de la phase d'exécution du vol. Elles sont bien couvertes, cumulant 79.63% des contributions. Afin de guider la conception des IHM relatives aux futurs systèmes de drones, nous proposons de collecter les différentes recommandations de conception issues des articles de cette sous-section.

3.3.7 RQ6 : Quelles sont les recommandations de conception issues de ces contributions IHM ?

Nous avons analysé puis synthétisé les recommandations formulées par les différents articles en lien avec l'IHM/PH. Ces recommandations peuvent inspi-

TABLE 3.14 – Répartition des représentations spatiales par tâches

Tâches	AVEC repr. spatiale	Réf.	SANS repr. spatiale	Réf.	Non mentionné	Réf.
Demande d'auto- risation	1 (100%)	[32]	0		0	
Contrôle	3 (50%)	[8, 101, 183]	0		3 (50%)	[24, 156, 18]
Préparation de mission	6 (100%)	[214, 237, 222, 287, 30, 32]	0		0	
Surveil- lance	17 (80.95%)	[62, 176, 8, 37, 175, 44, 166, 168, 290, 5, 237, 184, 220, 106, 183, 287, 30]	0		4 (19.05%)	[24, 156, 18, 173]
Pilotage	12 (75%)	[234, 267, 166, 168, 203, 5, 8, 218, 184, 174, 106, 199]	3 (18%)	[181, 155, 133]	1 (6.25%)	[173]
Etude de sécurité	1 (25%)	[222]	3 (75%)	[6, 75, 73]	0	

rer ou être mises en œuvre par des concepteurs de systèmes futurs. Nous les détaillons brièvement par la suite.

Recommandation 1 : Adapter et/ou personnaliser les interfaces

Plusieurs éléments peuvent être mis en œuvre pour cette recommandation :

- Un modèle de tâches d'un pilote de drone est proposé par [133]. Plusieurs articles donnent des suggestions sur la présentation des informations aux opérateurs lors des missions [5, 37, 75, 106, 174, 199].
- *Adapter l'interface à la mission et prendre en compte l'utilisation de la charge utile* [30]. En effet, la définition d'une mission de drones inclut le plan de vol mais aussi le plan d'utilisation de la charge utile.
- *Laisser les utilisateurs choisir et accéder rapidement aux informations et*

interactions qui leurs semblent pertinentes [37]. En fonction du rôle des utilisateurs (régulateur, opérateur, pilote à distance, contrôleur aérien), une visualisation différente et spécifique du système ainsi que de son état est préférable [75]. Par exemple, lors d'une mission de sauvetage, les télépilotes souhaitent mettre en plein écran automatiquement le retour visuel de la caméra dès qu'une victime est détectée [5], alors qu'un contrôleur souhaite disposer d'une vue d'ensemble des différents drones participants à cette mission et que le régulateur pourrait s'intéresser à un diagramme Bow-Tie des dangers identifiés [75].

- *Adapter automatiquement les interfaces utilisateurs et leurs comportements en fonction de critères ergonomiques* [37], *ou physiologiques* [156, 173]. Ainsi, le niveau de transparence de certains éléments peut dépendre du nombre de drones à surveiller [37]. L'adaptation doit être réalisée en fonction du stress et de la charge de travail mentale de l'opérateur [173]. Ces derniers peuvent être estimés directement par l'opérateur lui-même, ou calculés à partir des caractéristiques des tâches à accomplir ou encore provenir de mesures psycho-physiologiques. L'adaptation dynamique des interfaces utilisateurs par des techniques d'apprentissage automatique selon l'état cognitif estimé de l'utilisateur permettrait d'augmenter la capacité et la sécurité du système [156].
- *Fusionner les données issues de plusieurs capteurs* rend plus précise l'estimation de l'état cognitif d'un utilisateur [218].

Recommandation 2 : **Informers les utilisateurs sur l'environnement extérieur et le système de drone**

Les restrictions de vol, la météo, les recommandations des systèmes de Detect-And-Avoid sont considérées comme des informations critiques pour les pilotes à distance [199]. Plusieurs éléments peuvent être mis en œuvre pour cette recommandation :

- *Communiquer l'état de l'environnement extérieur est important* [5]. Fournir des indices visuels reconnaissables quand des conditions opérationnelles pouvant impacter le comportement du système sont rencontrées, par exemple en utilisant des pictogrammes lors des changements de conditions météorologiques.
- *Utiliser plusieurs modalités (visuelle, haptique, sonore, textuelle) pour aider les pilotes à pallier le manque d'informations sensorielles perçues par rapport à une présence physique à bord* [18, 173, 193].
- *Pouvoir montrer la trajectoire récente du drone et sa trajectoire prévue* [5].
- *Expliquer en temps réel l'impact des changements des conditions opérationnelles sur le comportement du système, ou ce que le système est explicitement autorisé à faire* [5]. Par exemple : "Vous rentrez dans une zone où la hauteur est limitée à 75m." ou "La visibilité actuelle est mauvaise. Les drones devront voler à vitesse réduite et plus près du pilote de

sécurité ".

- *Présenter de façons discernable les différentes options possibles lorsqu'une action des utilisateurs est requise* [5]. L'utilisation de teintes de couleurs et de symboles graphiques peut faciliter la distinction entre les différents états ou acteurs du système [106, 174].

Recommandation 3 : **Éviter la surcharge d'information**

Plusieurs éléments peuvent être mis en œuvre pour cette recommandation :

- *Limiter l'affichage aux informations essentielles et rendre les informations complémentaires disponibles sur demande* [5].
- *Éviter d'afficher certaines grandeurs difficiles à interpréter en temps réel comme les coordonnées géographiques (latitude et longitude) contrairement aux valeurs de vitesse et d'altitude par rapport au sol* [5].
- *Séparer les rôles d'opérateur de la charge utile et de télépilote* [5]. Par exemple, pour éviter une focalisation trop importante sur la localisation de la victime au détriment de la fonction de pilotage durant une mission de recherche et sauvetage.
- *Préférer un affichage intégré mais non pas séparé sur plusieurs écrans, particulièrement quand des interactions supplémentaires pour analyser la situation sont disponibles*, au moins pour le cas du Detect-And-Avoid [199].
- *Faciliter la recherche visuelle d'un objet par l'utilisation des "features"* : attributs basiques (teinte, taille, forme, ...) qui permettent de le différencier facilement des autres objets, quel que soit leur nombre de ces derniers [106].
- *Pouvoir identifier rapidement les zones où une intervention est requise via des alertes sans créer une surcharge d'information ni augmenter la charge de travail, dans le cas d'une visualisation du trafic* [44].

Recommandation 4 : **Alerter efficacement en fonction du contexte**

Deux éléments peuvent être mis en œuvre pour cette recommandation :

- Les caractéristiques des alarmes doivent dépendre de la proximité du danger ou de sa probabilité [30, 173]. Un exemple donné est celui du TCAS, dont l'interface et le son varient en fonction de la position et de la direction de l'intrus en cas de conflit aérien.
- *Utiliser différents types d'alertes pour différents éléments du système* [5]. Par exemple, la notification de détection d'une victime lors d'une phase de recherche doit être différente d'une alerte sur un niveau bas d'énergie qui nécessite un atterrissage rapide.

Recommandation 5 : Standardiser les commandes et vérifier leurs cohérences

Deux éléments peuvent être mis en œuvre pour cette recommandation :

- *Standardiser les contrôles pour les mini-drones* afin de faciliter leur prise en main [18]. Cela permet d'éviter les erreurs de pilotage quand les télépilotes passent d'un système à un autre [193].
- *Faire correspondre les éléments lorsque plusieurs moyens de pilotage sont disponibles et vérifier systématiquement la cohérence entre eux lors des opérations* [5]. Par exemple entre l'interface graphique et la télécommande, afin de faciliter la reprise de contrôle : déclencher une alarme sur l'interface graphique et bloquer le décollage tant que les leviers de sécurité ne sont pas correctement positionnés sur la télécommande du pilote à distance. Cela permet d'éviter les erreurs quand le contrôle d'un même drone peut se faire avec plusieurs interfaces.

Recommandation 6 : Faciliter le pilotage et la préparation de mission avec la réalité augmentée, la réalité virtuelle ou la 3D

L'utilisation de la réalité augmentée permettrait d'améliorer la conscience de la situation des télépilotes. Par exemple, la surimpression pour montrer la géométrie d'un conflit possible [166], voir la mission en 3D et ses différentes zones [30] ou repérer la piste d'atterrissage par mauvais temps [203].

L'utilisation d'une vue immersive en réalité virtuelle améliore la perception de la profondeur et permet de régler le point de vue offert afin de déterminer plus rapidement un chemin adapté pour le drone [214]. La réalité virtuelle permet d'accélérer la création des trajectoires par rapport à une interface en 2D. En utilisant des simulations en réalité virtuelle, une vue adaptative en temps réel améliore le contrôle et la précision lors du pilotage, en comparaison avec une vue à la première ou à la troisième personne [267].

L'utilisation de la 3D permettrait d'améliorer la planification de trajectoires, notamment la précision dans le placement des différents points dans l'espace [30].

Recommandation 7 : Utiliser des représentations cartographiques

Les représentations cartographiques sont utiles pour le contrôle [101] et pour la surveillance, notamment pour gérer les zones d'interdiction de vol [287]. Ces représentations sont également appropriées pour réaliser une étude de sécurité [222]. Par exemple, une carte incluant plusieurs couches telle que la densité de population, le facteur de protection en cas de chute, les zones interdites de vol ou encore les obstacles, est utilisée pour une étude de risques au sol.

L'utilisation des cartes tridimensionnelles sur le globe terrestre peut améliorer la précision et la fiabilité des opérateurs, pour la supervision de flotte [290].

Recommandation 8 : **Faire évoluer progressivement les interfaces**

Une approche graduelle est suggérée pour permettre aux contrôleurs aériens d'intégrer les drones en plus des avions dans leurs outils. Plusieurs éléments peuvent être mis en oeuvre pour cette recommandation :

- *Introduire des versions des outils actuels améliorées progressivement pour soutenir l'intégration des drones, si possible sans impacter les tâches existantes de contrôle aérien* [101]. Par exemple, ajouter une représentation symbolique des drones sur l'image radar des contrôleur avec un losange en plus de celle existante sous forme de carré des avions.
- *Utiliser la métrique du Technical Maturity Level (TML) pour mesurer la familiarité des contrôleurs aériens avec les nouvelles technologies et les nouveaux systèmes, incluant les drones, afin de vérifier l'effet des changements sur la charge de travail* [24].

Recommandation 9 : **Permettre la description, la comparaison et l'analyse de missions**

Plusieurs éléments peuvent être mis en oeuvre pour cette recommandation :

- *Fournir des outils pour élaborer et visualiser un plan de vol complet*, comprenant non seulement les trajectoires mais également des annotations sur le risque élevé dans certaines zones, des durées minimales et maximales de vol ou encore des zones d'atterrissage et de décollage des drones, est important pour évaluer la sécurité des plans de vol [32]. En plus de ces aspects spatiaux, des informations temporelles sont également importantes pour les risques de conflits avec d'autres appareils, par exemple l'heure et la durée des vols.
- *Fournir des outils permettant de comparer et voir les différences entre deux dossiers de sécurité* aide les utilisateurs à comprendre l'impact potentiel des changements sur la sécurité [6].
- *Fournir des outils permettant de rejouer des missions déjà effectuées* permet une analyse rétrospective bénéfique pour la sécurité des missions futures [5].

Recommandation 10 : **Mettre à profit les outils et méthodologies soutenant la conception des systèmes de gestion de trafic de drones (UTM)**

Les travaux sur l'UTM aboutissent à des outils et des recommandations qui devraient être réutilisés comme cadre de travail pour la conception des futurs systèmes UTM. Il existe plusieurs études s'intéressant à :

- l'outillage pour l'analyse, la description et la modélisation des interactions entre les opérateurs humains et les systèmes automatisés [184] ;
- une analyse des responsabilités et des priorités d'un opérateur UTM et la méthodologie pour concevoir un système d'aide à la décision [220] ;

- une approche pour la prise en compte systématique des facteurs humains lors de la conception des stations de contrôle au sol et autres IHM [133] ;
- les distances minimales d’alerte avant de pénétrer dans une zone interdite de vol [8] ;
- la surveillance des petits drones évoluant dans le VLL en milieu urbain par un opérateur [106].

3.3.8 Perspectives identifiées

Dans cette sous-section, nous présentons certaines perspectives de recherches en IHM identifiées dans cette revue systématique de la littérature sur le support à la sécurité des missions de drone.

Le guide relatif aux facteurs humains dans les UAS [133] devra être mis à jour régulièrement à la fois par la recherche et l’expérience opérationnelle.

Plusieurs articles présentant des expérimentations menées en laboratoire via des simulations [24, 44, 214, 237, 267, 290], des prototypes non réalistes [5] ou des vols d’essais [32, 166] préconisent de réaliser des expériences en conditions réelles ou à une échelle plus large afin de valider les résultats obtenus [8]. D’autres expérimentations plus spécifiques sont également évoquées : la réalisation des cas d’études dans lesquels le comportement des drones ne peut pas être facilement expliqué ou compréhensible afin d’étudier la conscience de la situation [5], la réalisation des études mettant en oeuvre des missions complexes ou avec plusieurs drones pour valider les apports de la réalité virtuelle pour le pilotage de drones [214], l’identification des exigences minimales pour un affichage de système gérant le *Detect-And-Avoid* [199].

Pour les articles mettant en oeuvre des adaptations d’interfaces lors de l’utilisation, les perspectives principales sont l’exploitation de plus de sources de données [234], l’emploi d’algorithmes d’apprentissages différents [37, 156, 174, 183, 218] et le test des résultats sur plusieurs scénarios [234]. L’impact du temps de réaction des opérateurs et l’ajustement de la transparence des éléments de l’interface utilisateur pour améliorer l’adaptation devra aussi faire l’objet de futures études [37]. Etudier les techniques de fusion de données pour la détermination de la charge cognitive et combler le manque d’une méthode universelle pour la mesure de la charge mentale applicable à tous les scénarios opérationnels sont envisagés [37].

Pour aider l’utilisation de systèmes automatisés, l’explicabilité de l’intelligence artificielle utilisée et l’identification des critères pour juger de la qualité et de la fiabilité de l’explication fournie par la machine ainsi que sa présentation aux utilisateurs (*Explainable User Interface*) devra être étudiée [156]. Pour permettre aux utilisateurs de contrôler la mission à haut niveau, la possibilité de communiquer les objectifs de la mission aux drones hautement automatisés, qui auront la charge de résoudre eux-même les tâches nécessaires pour les réaliser, est également envisagée [5]. La charge de travail des contrôleurs aérien lorsque des fonctions d’assistance automatisées sont incluses devra être étudiée [24]. Plusieurs pistes concernant l’automatisation de certaines tâches sont évoquées : étudier les interfaces adaptatives pour la transition d’une opération avec un pi-

lote unique à une opération sans pilote à bord ainsi que les scénarios Extended Visual Lign of Sight (EVLOS), ou en vue étendue, pendant lesquels plusieurs télépilotes se transfèrent les commandes de drones avec l'aide d'observateurs visuels [173], concevoir des outils permettant d'assembler des études de sécurité automatiquement et de développer des interfaces permettant d'explorer ces études [73, 75].

Faire le lien avec les technologies futures de l'UTM et de contrôle aérien existant est également mentionné par plusieurs articles. Il s'agit principalement d'ajouter des fonctionnalités dédiées à la gestion des drones dans les interfaces existantes pour la surveillance du trafic aérien [30, 32, 48], ou de réaliser des expérimentations avec des contrôleurs aériens pour évaluer les nouveaux outils [220].

Concernant la réalisation d'études de sécurité, plusieurs articles indiquent vouloir améliorer les interfaces utilisateurs proposées pour enrichir le type d'information et de recommandation fournies aux utilisateurs [6, 237], permettre des recherches avancées et des liens entre les multiples documents qui constituent l'analyse de sécurité [73] ou encore des liens entre l'analyse de sécurité et la conception des trajectoires de la mission [75].

Les télé pilotes estiment que la sécurité est la plus importante mais les chercheurs en IHM ne la placent qu'au deuxième rang, surtout en ce qui concerne les IHD [181]. De plus, les recherches à ce sujet se concentrent presque exclusivement sur la phase de vol. En réalité, en plus des tâches relatives à la sécurité, la phase pré-vol, incluant la préparation de mission et les activités nécessaires relatives à chaque type d'application, est beaucoup plus importante en terme de temps alloué et de travail à faire [181]. Ainsi, pour améliorer la sécurité, il existe des opportunités pour chacune des tâches de la phase de pré-vol surtout celles qui sont le moins étudiées.

3.4 Discussion

Notre Revue Systématique de la Littérature indique un certain nombre de tendances dans les recherches sur le soutien à la sécurité des opérations de drones. Il y a des tendances fortes dans les axes et les approches de recherche dont nous discutons dans cette section. Pour plus de clarté, nous structurons cette discussion autour de trois thèmes principaux : les étapes de réalisation des missions, les représentations géographiques pour les analyses de sécurité et les opportunités pour la réalité augmentée et virtuelle. Enfin, nous considérons les limites de validité de notre méthode. Ces limites sont requises par la liste de contrôle de la bonne qualité d'une RSL, exigence de PRISMA [198].

3.4.1 Disparités entre les étapes et les tâches utilisateurs

Nos résultats mettent en avant que les étapes de préparation de la mission et surtout de la réalisation concentrent l'attention des recherches (89.13% des articles) et que les étapes de la phase avant-vol (conception du drone, étude de

sécurité, demande d'autorisation), la phase après-vol ainsi que de la réglementation sont bien moins considérées. Ce déséquilibre n'est pas anodin, car toutes ces autres étapes sont importantes pour assurer la sécurité des missions, d'autant plus que l'évolution de la réglementation va impacter fortement les études de sécurité. De plus, comme identifié par Lungjblad et al. [181], les tâches avant le vol constituent une partie importante du métier de pilote de drone commercial. La phase après-vol est la moins étudiée, au contraire de l'aviation avec pilotes à bord qui s'est fortement appuyée sur l'expérience opérationnelle et les méthodes réactives pour améliorer sa sécurité. Il n'existe pas de contribution IHM/FH qui concerne les activités après-vol.

La tendance du trafic de drones étant à l'augmentation, cela rendra plus complexes la production et le traitement d'études de sécurité, tant pour leur réalisation, leur présentation et leur soumission que pour leur vérification, validation et approbation. Nous pensons qu'il est important de fournir aux opérateurs et aux régulateurs des outils pour faciliter et accélérer la réalisation des études de sécurité pour obtenir/délivrer les autorisations d'exploitation en catégorie spécifique.

Il est important de souligner que, l'European Cockpit Association (ECA), ou l'association européenne des pilotes de ligne, met en garde sur la possibilité que SORA et les scénarios standards soient seulement considérés comme un raccourci pour aller plus vite au détriment de la sécurité [95]. Elle suggère que des autorisations basées uniquement sur les déclarations d'exploitants ne soient pas permises, pour le moment. Il est donc important d'accélérer les démarches mais pas le processus de réflexion, qu'il faut au contraire soutenir. Toute tentative de réduire la réflexion peut engendrer des résultats inattendus qui pourraient réduire la sécurité [298]. Ainsi, il est important que les résultats d'une SORA soient plus facilement contrôlés. Non seulement au niveau de la bonne application de la méthodologie mais aussi de la vraisemblance du résultat. Donc soutenir la réalisation des études de sécurité par la méthodologie SORA est une étape cruciale pour maximiser la sécurité des opérations de drones en catégorie spécifique.

3.4.2 Usage de la réalité augmentée et de la réalité virtuelle

La réalité augmentée et la réalité virtuelle sont étudiées dans quatre articles. Les informations supplémentaires augmentent la conscience de la situation des télépilotes et peuvent constituer une aide effective au pilote pendant la phase de vol [203] ou aux préparateurs pendant la planification de mission [30]. La réalité virtuelle apporte plus de facilité lors du pilotage ainsi que plus de rapidité lors de la planification de trajectoires et leurs corrections [214, 267]. L'usage de ces technologies et l'étude des avantages qu'elles pourraient amener pour le pilotage et les autres tâches en-vol (surveillance, contrôle) ainsi que la préparation de mission et les autres tâches de la phase pré-vol (analyse de sécurité, demande d'autorisation) méritent d'être approfondies. Toutefois, pour la suite de ce manuscrit, nous ne n'y intéresserons plus.

3.4.3 Représentations géographiques pour les analyses de sécurité

Nos résultats indiquent que pour les étapes de préparation de mission et du vol, la plupart des outils disposent de représentations spatiales comme des images radar ou des cartes. Plus en amont, les analyses de sécurité ne se basent pas, sauf exception [222], sur ce genre de représentation mais davantage sur des diagrammes et des éléments textuels plus proches des formalismes utilisés pour raisonner sur les risques. Nous pensons que cette séparation est préjudiciable à la sécurité car cela ne permet pas une transition fluide entre les différentes étapes et fait courir un risque de manque d'information contextuelle sur la géographie du lieu envisagé pour la mission.

Les possibilités offertes par les approches de *Detect-And-Avoid* ainsi que la planification et la replanification qui sont basées sur des problèmes géographiques pourraient aussi servir dès l'élaboration des études de sécurité ou la demande d'autorisation. Lors de l'analyse de sécurité d'une mission nécessitant une autorisation spécifique, l'utilisation d'outils interactifs basés sur des représentations géographiques, permettrait vraisemblablement de faciliter les échanges entre les exploitants et les régulateurs avant la mission, puis d'assurer sa surveillance lors de son déroulement. Les outils d'analyse géovisuelle pourraient servir de base de départ pour la conception d'interactions soutenant l'étude de la sécurité des opérations de drones.

3.4.4 Limites sur la validité

Les cas où une contribution n'envisageait pas une mission ou un scénario ou un cas d'utilisation dans lequel il fallait soutenir la sécurité n'ont pas été retenus. L'inaccessibilité de certains articles, le référencement sous d'autres mots-clés ou dans d'autres bases de données que celles utilisées (par exemple, Scopus n'a pas été consulté), peuvent impacter le processus de sélection des articles. Celui-ci a été suivi aussi rigoureusement que possible mais peut présenter des biais. Dans le cas où certains articles abordaient plusieurs approches potentiellement proches pour le soutien à la sécurité, un des auteurs a dû effectuer la classification. Par exemple, les notions de *Detect-And-Avoid* et de planification de trajectoires peuvent être relativement similaires puisque l'évitement consiste à proposer une nouvelle trajectoire. Cette classification a pu influencer les résultats. L'ajout d'articles issus d'une première itération de la RSL mais avec des mots clés très ciblés dans le titre nous a semblé pertinente mais peut modifier le nombre total d'articles considérés, l'opération de filtrage et la répartition finale.

Aucune méthode de revue de la littérature n'est exempte de défauts. Une RSL n'est pas exhaustive et peut ignorer certaines publications certes importantes pour un sujet en particulier mais ne respectant les critères de sélection et d'inclusion.

Enfin, pour certains articles, bien que certaines réponses à la méthode de questionnement (*Qui ? Quoi ? Où ? Quand ? Comment ? Combien ? Pourquoi ?*) n'y figuraient pas explicitement, les explications, les contraintes, la façon

de procéder aux simulations et aux tests ont parfois permis de compléter les informations. Selon l'extracteur, le filtrage et la classification peuvent varier. La vérification par un second extracteur nous permet de minimiser les éventuels biais de sélection et de classification.

3.5 Résumé

Nous avons réalisé une Revue Systématique de la Littérature sur le soutien à la sécurité des opérations de drones en utilisant une déclinaison de la méthode QQQQCCP pour la méta analyse. La revue systématique est une méthode de synthèse de la connaissance rigoureuse, structurée et reproductible. Elle nous a permis de dégager notamment huit grandes catégories d'approche : le Détecter & Éviter, les IHM et facteurs humains, l'intégrité de l'aéronef, les analyses de sécurité, la planification de trajectoires, la gestion du trafic de drones, la cyber-sécurité et le géorepérage. Nous avons identifié les types de contributions de l'IHM et des facteurs humains pour les tâches de surveillance, de pilotage, de préparation de missions, d'analyses de sécurité, de contrôle et de demande d'autorisation. Nous avons collecté et consolidé les recommandations formulées par les articles issues de la RSL pour maximiser la sécurité lors de la conception d'interfaces et d'interactions. Elles sont : 1) adapter et/ou personnaliser les interfaces, 2) informer les utilisateurs sur l'environnement extérieur et le système de drone, 3) éviter la surcharge d'information, 4) alerter efficacement en fonction du contexte, 5) standardiser les commandes et vérifier leurs cohérences, 6) faciliter le pilotage et la préparation de mission avec la réalité augmentée, la réalité virtuelle ou la 3D, 7) utiliser des représentations cartographiques, 8) faire évoluer progressivement les interfaces, 9) permettre la description, la comparaison et l'analyse de missions, 10) mettre à profit les outils et méthodologies soutenant la conception des systèmes de gestion de trafic de drones. Ces travaux fournissent une base pour comprendre et décrire le domaine du soutien à la sécurité des missions de drones.

Nous avons identifié des pistes de recherches pour les tâches d'analyse de sécurité et de demande d'autorisation en phase pré-vol qui sont peu étudiées alors qu'elles sont cruciales pour la catégorie d'exploitation spécifique, notamment l'utilisation de représentations géographiques couplées avec des outils d'analyse géovisuelle.

Contributions

Selon la triangulation [187], les contributions présentées ici sont de nature théorique :

- une photographie de la littérature récente traitant du support à la sécurité des missions de drones, répondant aux questions Quoi, Qui, Où, Quand, Comment, Combien et Pourquoi ;

- l'identification des cas d'usage les plus représentés sur ce sujet dans la littérature ;
- la confirmation que la phase la mieux étudiée d'une opération est la phase de vol et que la planification de mission et la phase après-vol nécessiteraient davantage d'efforts de recherche en ce qui concerne le support à la sécurité aérienne ;
- l'identification de huit approches pour soutenir la sécurité des opérations de drones dans la littérature ainsi que leurs proportions ;
- l'identification des contributions du domaine de l'IHM ;
- l'identification des caractéristiques de l'utilisation des cartes pour soutenir les missions de drones et les lacunes en matière de recherche sur ce point ;
- une synthèse des recommandations pour la conception de systèmes davantage utilisables pour les opérations de drones, issues de la littérature récente.

Chapitre 4

Processus de demande d'autorisation

"If I had six hours to chop down a tree, I'd spend the first four hours sharpening the axe."
– Abraham Lincoln

"If you can't describe what you are doing as a process, you don't know what you're doing."
– Edwards Deming

Nous avons vu que de nombreux travaux concernent l'aide à la sécurité des opérations de drone selon différentes perspectives comme le matériel, les algorithmes ou l'interaction humain-machine et que la plupart des solutions concernent le déroulement de la mission et peu de travaux concernent la phase de préparation de mission ou la phase après-vol.

A notre connaissance, aucune étude n'a été menée sur les exploitants devant requérir une demande d'autorisation d'exploitation. Selon Darses et de Montmollin [68], comprendre un travail consiste dans un premier temps à faire la distinction entre le travail prescrit et le travail réel. Le travail prescrit est celui qui doit être exécuté et qui est souvent officialisé au moyen d'une description de travail ou d'autres documents administratifs. Le travail réel, en revanche, est plus complexe : il prend en compte l'ensemble des actions et stratégies déployées par le salarié pour mener à bien son activité. En réalité, un salarié est amené à rechercher en permanence l'équilibre entre la demande et les contraintes auxquelles il fait face. Les contraintes peuvent être de nature matérielle, technique, organisationnelle, etc. D'une façon imagée, le travail prescrit correspondrait à la partie visible d'un iceberg, alors que le travail réel serait sa partie cachée et l'ensemble des activités, choix et contraintes que le salarié doit faire pour réussir sa mission [92]. Le travail décrit correspond au travail réel tel que décrit par ceux qui le réalisent.

L'objectif du projet présenté dans ce chapitre est donc d'étudier les points de vue des acteurs de ces processus pour caractériser les mécanismes réellement mis en oeuvre, les tâches, les responsabilités, ainsi que des recommandations pouvant servir au design des futurs systèmes.

4.1 Méthode

Nous avons commencé par mener des entretiens avec des opérateurs de drones, des accompagnateurs en étude de sécurité et des régulateurs afin de mieux comprendre le processus utilisé par les opérateurs de drones professionnels lorsqu'ils préparent une mission de drones nécessitant une AESC. Après une phase d'analyse aboutissant à un modèle descriptif et à l'identification d'une première série de 10 recommandations, nous avons consolidé nos résultats à l'aide d'un questionnaire de suivi.

4.1.1 Entretiens

Nous avons mené quatorze entretiens avec des responsables de l'exploitation des drones travaillant pour des opérateurs de tailles diverses, ainsi que deux entretiens complémentaires avec deux équipes de régulateurs. Notre objectif était de caractériser les pratiques existantes et d'identifier les opportunités pour la conception de nouveaux systèmes interactifs à partir de multiples perspectives opérationnelles. Ces entretiens ont été réalisés entre janvier 2020 et octobre 2021, dont 10 par vidéo-conférence. Chaque opérateur avait déjà effectué au moins une mission nécessitant une AESC avec une évaluation détaillée des risques. Les tâches liées à la sécurité des opérations par drone s'étalent sur une longue période, et les résultats sont présentés dans divers documents communiqués aux autorités. Ces tâches sont donc difficiles à observer directement, et interroger les personnes impliquées semble une méthode adéquate pour obtenir des données contextuelles, des exemples concrets de situations problématiques, ou pour explorer de nouvelles approches avec les opérateurs.

Nos entretiens étaient guidés par une liste de seize questions présentées dans la table 4.1 selon cinq axes. Ces questions couvrent la démographie de l'établissement concerné, les missions qui ont été réalisées, les études de sécurité et demandes d'autorisation, les outils utilisés, et enfin, quand c'était possible, l'exploration de nouveaux concepts. Elles ont été définies pour explorer en détail et de manière contextuelle le processus de demande d'autorisation et de réalisation d'étude de sécurité. Les informations sur la démographie et les missions effectuées servent à caractériser les participants aux entretiens, et à bâtir les échanges sur des situations réelles et vécues. Nous avons aussi utilisé des techniques d'incident critique [102] lors des questions 6, 9 et 14, concernant respectivement les missions, les demandes d'autorisation, et les outils pour les réaliser. La RSL a identifié que la réalisation d'opérations de drones impliquait des représentations cartographiques, mais que peu d'outils d'analyse de risque les utilisaient. De plus, les demandes d'autorisation d'exploitation nécessitent une collaboration

TABLE 4.1 – Questions posées lors des entretiens

	Démographie de l'entité
1	Pourriez-vous décrire la structure en termes de nombre de salariés, d'ancienneté et de nombre de drones utilisés ?
2	Quelles sont les caractéristiques de vos clients (grands groupes, particuliers, nationaux ou internationaux) ?
3	Combien de missions effectuez-vous par an environ ?
	Missions effectuées
4	Quels types de missions réalisez-vous en termes de but, de distance parcourue, de durée, de type d'aéronefs et de composition des équipages ?
5	Pourriez-vous décrire la dernière mission que vous avez effectuée ?
6	Vous rappelez-vous d'un incident ou d'un évènement marquant lié à la sécurité lors d'une opération de drone ?
7	Lors des missions quels sont les éléments impactant la sécurité ? Par exemple, les conditions météorologiques, la population sur place ou les autres usagers du ciel.
	Demande d'autorisation
8	Combien d'études de sécurité concernant les opérations de drones avez-vous réalisées en vue d'une demande d'autorisation ? Et combien ont été réalisées en utilisant la méthodologie "Specific Operations Risk Assessment" ?
9	Pourriez-vous décrire les dernières missions pour lesquelles vous avez effectué une demande d'autorisation ? Quels problèmes avez-vous rencontrés ?
10	Quelle est la durée de ce processus et le nombre d'itérations avec le régulateur ?
11	Avez-vous élaboré des stratégies pour accélérer le traitement de vos demandes ?
12	Avez-vous utilisé un support (une entreprise ou un logiciel) pour l'étude de sécurité ?
	Outils utilisés pour chaque phase de la mission
13	Quels outils utilisez-vous lors des différentes phases d'une mission, c'est-à-dire l'élaboration du concept d'opération, l'étude de sécurité, la demande d'autorisation, la préparation de la mission, l'exécution (le vol) et enfin la phase d'après la mission ?
14	Pourriez-vous décrire l'utilisation de ces outils lors de votre dernière mission avec demande d'autorisation ? Quels problèmes avez-vous rencontrés ?
	Exploration d'approches basées sur les cartes et la collaboration
15	Que pensez-vous de réaliser vos études de sécurité directement sur des cartes avec différentes couches de données ?
16	Quelles interactions ou visualisations vous permettraient d'améliorer le processus de réalisation de vos études de sécurité ? Avec une collaboration avec les régulateurs ?

entre l'opérateur et le régulateur. Les questions 15 et 16 ont donc exploré le concept de la réalisation de l'étude de sécurité sur une carte, et de son intégration dans le travail collaboratif avec le régulateur. Nous avons mené un premier entretien avec un opérateur de drone (OP0) pour évaluer nos questions. Comme certaines nécessitaient des clarifications, nous les avons reformulées et écarté les résultats.

Participants

Le recrutement pour ces entretiens était guidé par la volonté de maximiser la diversité des participants, en termes par exemple de taille de structure ou de domaines d'application. Les caractéristiques différentes des participants permettent une plus grande couverture de nos problématiques avec des perspectives qui varient en fonction des pratiques et des ressources disponibles. Les opérateurs et pilotes susceptibles d'effectuer des missions nécessitant des demandes d'autorisation d'exploitation ont été contactés par e-mail ou par téléphone. Les autorités nous ont par ailleurs suggéré certains d'entre eux. La table 4.2 contient la description des caractéristiques des participants.

Au total, nous avons mené seize entretiens. Les dix premiers concernent des opérateurs de drones, c'est-à-dire des entreprises menant des opérations de drones nécessitant des études de sécurité et ayant besoin de soumettre des demandes d'AESC(OP1 à OP10). Les interlocuteurs étaient les responsables des missions de drones, parfois eux-même télépilotes ou accompagnés de télépilotes. Quatre autres entretiens concernent des accompagnateurs pour les études de sécurité (AS1 à AS4), c'est-à-dire des entreprises de conseil qui effectuent ces études pour le compte d'un client, qui devra lui-même soumettre la demande d'exploitation. Tous les interviewés opèrent en France. Nous avons également mené deux entretiens avec des équipes de la Direction de la Sécurité de l'Aviation Civile (RG1 et RG2). La première équipe a pour rôle de vérifier et valider les performances déclarées des systèmes de drones. La seconde équipe est en charge d'analyser, vérifier et valider les demandes d'autorisation d'exploitation de drones pour toute la France. Ce dernier entretien nous a permis de comprendre leur façon de travailler, la communication avec les opérateurs et de leur présenter partiellement certaines des premières recommandations, à travers un prototype proposant des interactions sur des couches de données géographiques. Ce prototype sera détaillé au chapitre suivant.

Déroulement des entretiens et analyse des données

Les entretiens ont tous été menés par l'auteur avec un ou deux des autres membres de l'encadrement de thèse en observateur, pouvant intervenir pour clarifier ou insister sur un aspect particulier. Nous avons globalement respecté la trame du questionnaire pour chaque entretien mais l'exécution a pu être parfois modifiée pour s'adapter aux discussions avec les participants. Les entretiens ont duré entre une et deux heures. La plupart d'entre eux ont été enregistrés, sauf ceux concernant OP1, OP2, OP4 et AS4, pour des raisons de confidentialité, puis

TABLE 4.2 – Description des participants aux entretiens.

** l'entrevue a été effectuée en 2020, la réglementation EU n'est entrée en vigueur qu'en janvier 2021,

*** l'opérateur a été accompagné par un tiers pour la réalisation de ses études de sécurité

Code	Constructeur	Exploitant	Accompagnateur Étude de Sécurité	Nombre d'interviewés	Nombre d'employés de la structure	Licence de Pilote d'aviation conventionnelle pour les télépilotes	Nombre de SORA soumises	Missions endurantes	Hors-vue	En Vue Étendu	Applications
OP1		✓		1	10-50	✓	0*	✓	✓		Acquisition de données (AD)
OP2	✓	✓		4	>50	✓	0*	✓	✓		AD, Formation (FMT)
OP3	✓	✓		1	<10	✓	0*	✓	✓		AD
OP4		✓		1	<10		0*				AD
OP5		✓		1	>50	✓	5-10	✓	✓		AD
OP6	✓	✓		1	>50	✓	5-10	✓	✓	✓	AD, Expérimentation (EXP)
OP7		✓		1	<10		0**		✓		AD
OP8	✓	✓		1	>50	✓	>10	✓	✓	✓	AD, EXP, FMT
OP9		✓		1	>50	✓	1-5	✓	✓		EXP
OP10		✓	✓	1	10-50		5-10			✓	Essaim de plusieurs centaines d'aéronefs
AS1			✓	1	<10	✓	5-10		✓		AD, Transport de biens (TB)
AS2	✓	✓	✓	1	10-50		1-5		✓		AD, EXP, TB
AS3	✓	✓	✓	3	>50	✓	1-5		✓		AD, FMT
AS4			✓	3	>50	✓	1-5			✓	AD, TB

retranscrits pour l'analyse. Nous avons également demandé aux participants de nous montrer les documents et outils utilisés lors de l'élaboration des missions et de l'étude de sécurité. Pour des raisons de confidentialité, nous ne pouvons pas diffuser ces documents car ils contiennent des informations sur leurs clients. Nous avons ensuite analysé les données de façon qualitative en utilisant des techniques de codage libre issues de la théorie enracinée [261]. Plusieurs analyses ont été effectuées au fur et à mesure du déroulement du processus, afin de faire ressortir les catégories et les thèmes ainsi que de formuler des recommandations. Les thèmes et les recommandations ont été affinés et développés lors d'entretiens ultérieurs lorsque cela était possible.

4.1.2 Questionnaire

Pour consolider les résultats des entretiens, nous avons demandé aux opérateurs et aux régulateurs de remplir un questionnaire en ligne. Notre objectif était de soumettre à la critique des parties prenantes le modèle décrit du processus que nous avons proposé à partir des entretiens ainsi que les recommandations pour soutenir les tâches effectuées au cours de leur processus de travail.

Structure

Le questionnaire comportait deux sections, la première sur les recommandations et la seconde sur le modèle conceptuel du processus. La première section visait à évaluer le niveau d'accord de chaque répondant avec les recommandations à l'aide d'une échelle de Likert en 5 points, Figure 6 de l'annexe D. Ils pouvaient également fournir des réflexions ou des commentaires supplémentaires, y compris des recommandations additionnelles. Ils devaient également classer les recommandations en fonction de leur priorité, en utilisant une échelle de classement de type Likert à 7 niveaux afin de gagner en précision pour la hiérarchisation avec deux choix supplémentaires : " La plus importante s'il n'en fallait qu'une " et " inutile " [152].

La deuxième section était destinée à évaluer le modèle conceptuel proposé du processus avec les tâches associées que nous avons identifiées. Ils devaient évaluer son exactitude et sa représentativité à l'aide d'une échelle de Likert à 5 points et donner plus de détails pour l'améliorer, Figure 7 de l'annexe D. La dernière question concernait leurs réactions à l'ensemble des recommandations et au modèle conceptuel afin de recueillir des informations supplémentaires sur notre travail.

Répondants

Le questionnaire a été envoyé à tous les opérateurs interrogés, y compris OP0, ainsi qu'aux régulateurs, soit 17 répondants possibles. Nous avons reçu les questionnaires complétés de 7 d'entre eux, ce qui donne un taux de réponse de 41,18%. Deux répondants sont des régulateurs de l'équipe RG2, dont REGHU, le chef de l'unité en charge de la vérification et de la validation des demandes

d'AESC, et REGAG, un des agents. A part OP0, qui est uniquement un opérateur, les autres répondants sont à la fois des opérateurs et des consultants en études de sécurité (OP8, OP10, AS1, AS2).

4.2 Résultats

Dans cette section, nous rapportons les résultats de nos entretiens et du questionnaire subséquent, en nous concentrant sur deux objectifs principaux : d'une part, décrire les pratiques actuelles des professionnels utilisant des drones dans le cadre de missions complexes en termes de sécurité, et d'autre part, identifier des pistes pour la conception de futurs systèmes afin d'améliorer le processus d'autorisation et la sécurité des opérations par drone. Nos observations et conclusions sont organisées en quatre catégories : 1) les types de missions et la description des étapes, 2) l'établissement du concept d'opération de la mission, 3) l'évaluation et la maîtrise des risques, 4) la collaboration entre opérateurs et régulateurs pour la demande d'autorisation. Par souci de concision et de clarté, nous détaillons et discutons nos recommandations de conception en même temps que les résultats.

4.2.1 Types de missions et description des étapes

Nos entretiens ont permis de considérer de nombreux types de missions de drones couvrant diverses industries, nécessitant une AESC. Les missions étudiées relèvent de l'inspection industrielle (OP3, AS1, AS2, AS4), de la récupération de données météorologiques (AS4), de l'inspection de vastes réseaux de transport et d'énergie (OP1, OP2, OP5, AS1), des vols expérimentaux de concepts d'applications de drones (OP4, OP6, AS2) ou de nouvelles charges utiles (OP9), de l'acquisition de données LIDAR (*Laser Imaging Detection And Ranging*), thermiques et multispectrales (OP2, OP4, OP8), de spectacles aériens avec plusieurs centaines de drones de nuit et proche des zones urbaines (OP10), et de la reconnaissance de possibles avalanches et de recherche-sauvetage en milieu hostile (OP7). Hormis par OP8, les études pour les livraisons par drones (AS2, AS4) et la surveillance de zones industrielles par drones autonomes (AS1, AS2, AS3, AS4) ont été faites par des accompagnateurs aux réalisations d'étude de sécurité.

Pour tous nos participants, les trois étapes principales d'une mission de drone sont : la planification de la mission, l'exécution des vols, et enfin les activités réalisées après les vols.

Pour réaliser une mission complexe d'un point de vue de la sécurité, tous les exploitants interviewés ont expliqué qu'une phase préparatoire considérable était nécessaire avant le vol proprement dit. Cette étape qui nécessite des tâches très techniques est réalisée sur une longue période du fait des délais de traitement, et se montre complexe car elle fait intervenir plusieurs parties prenantes avec de nombreux documents à traiter. À ce propos, OP3 nous a confié : *"Aujourd'hui le travail de préparation de mission, représente, je serais tenté de dire, quelque*

chose entre 60 et 70% de la technicité des opérations aériennes". De même, AS1 déclare : "Le temps de travail moyen pour une SORA est de 100 heures, 250 heures pour les missions complexes", tandis que OP10 indique : "Il a fallu six mois de travail pour vingt minutes de vol".

La réglementation prescrit qu'un opérateur doit obtenir une autorisation d'exploitation avant toute opération en catégorie spécifique, comme illustré par la Figure 4.1-(a). En pratique et dans les détails, cette étape de planification de la mission est composée de plusieurs sous-tâches qui peuvent être regroupées en trois activités. Il s'agit de l'établissement d'un concept d'opérations, l'évaluation des risques opérationnels et l'obtention d'une autorisation d'exploitation en catégorie spécifique, comme illustré dans la Figure 4.1-(b). Le concept d'opérations (ou "Conops") est la description de ce qui va être réalisé avec le drone, où et quand, avec quel système et quels participants. Il sert à présenter clairement les opérations qui seront effectuées dans le cadre de la mission. L'évaluation des risques opérationnels est une analyse qui permet de définir les exigences que devra satisfaire un exploitant avant de faire voler son drone. Elle sert à identifier puis maîtriser les risques afin de garantir un niveau de sécurité visé. La réglementation préconise l'utilisation de la méthodologie SORA pour mener cette analyse. L'obtention de l'autorisation d'exploitation spécifique consiste pour un exploitant à soumettre un dossier au régulateur incluant une évaluation des risques opérationnels, ainsi que d'autres documents comme les formulaires administratifs, des autorisations provenant de la préfecture, ou encore un protocole d'accord avec la tour de contrôle d'un aéroport. Au cours de l'instruction de ce dossier, des révisions successives peuvent être effectuées en fonction des demandes de clarification ou de moyens d'atténuation plus efficaces formulées par le régulateur.

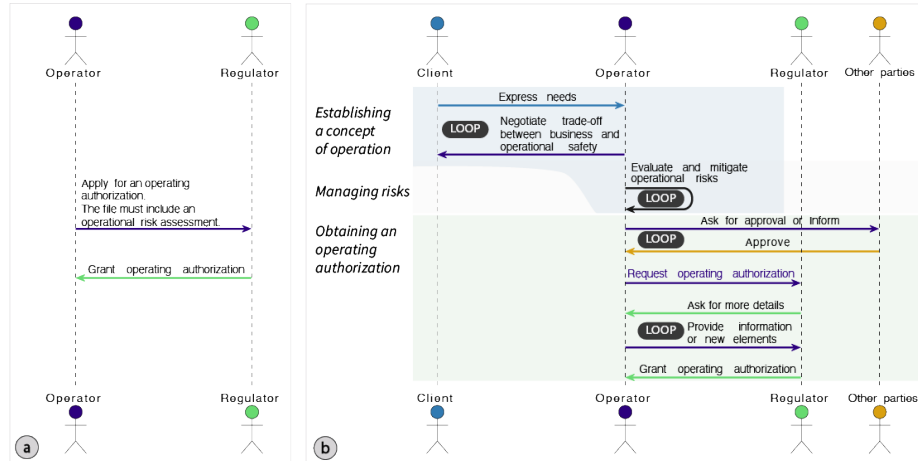


FIGURE 4.1 – a) Le processus prescrit. b) Le processus prescrit, dans sa version allégée. Version complète en annexe, à la Figure 5.

Notre première itération du modèle a obtenu une évaluation moyenne de 0,14 (SD=0,83), ce qui se situe entre neutre et "Je pense que le modèle est correct dans l'ensemble". Le retour d'information nous a permis de préciser que d'autres parties prenantes, telles que les autorités de police locales, peuvent être impliquées avant l'approbation officielle afin d'atténuer certains risques. Par exemple, AS2 a ajouté qu'*"il est nécessaire d'ajouter des négociations entre le client et l'opérateur selon le retour d'information de la DSAC"*. Le régulateur REGHU a également apporté des précisions sur les échanges entre les rôles des parties prenantes : *"Il me semble important de préciser que ce n'est jamais le client final qui demande l'autorisation d'exploitation. Celle-ci est accordée à la personne (physique ou morale) qui exploite le(s) drone(s)"*. Commentant notre modèle initial, REGHU a ajouté que *"le régulateur peut également intervenir dans l'étape amont d'évaluation des risques avant la demande formelle"*. La figure 5 disponible dans l'annexe C illustre un diagramme de séquence complet du processus décrit, en montrant les tâches optionnelles et/ou alternatives.

4.2.2 Établir un concept d'opération

L'établissement d'un concept d'opérations est un processus itératif impliquant généralement le client et qui se compose de plusieurs activités. AS4 indique que *"Le concept d'opérations est le plus important, il faut bien définir ce qu'on va faire, à quel endroit"*. Il est également important que le document soit clair comme expliqué par AS1 : *"il faut définir des concepts d'opérations qui soient suffisamment clairs et compréhensibles par des néophytes"*. Chaque concept d'opération pose des problèmes différents et conduit à des solutions différentes. Pourtant, nous avons observé des phases communes à la plupart des missions étudiées, et nous les décrivons ci-dessous.

Aligner les besoins du client et la faisabilité de la mission

Tous les exploitants interviewés communiquent avec leurs clients afin d'identifier leurs besoins, à l'exception d'OP7 et d'OP10 qui bénéficient eux-mêmes des missions de drone qu'ils réalisent. Pour OP1, OP5, OP6, OP9 et AS4, il s'agit d'un client interne à leur organisation, alors qu'il peut s'agir d'un client externe pour les autres. Pour recueillir les besoins du client, les participants ont indiqué démarrer avec un échange par téléphone, par vidéo conférence ou lors d'un rendez-vous physique. Le travail synchrone entre le client et l'exploitant avec des échanges immédiats permet d'obtenir rapidement une esquisse du concept d'opérations. AS1 utilise une approche holistique avec le client afin de récupérer tous les éléments nécessaires pour l'évaluation des risques opérationnels. Cette approche consiste à recueillir toutes les informations nécessaires dans un fichier conçu par l'accompagnateur, afin de caractériser au maximum la mission. Ces informations sont utiles à la fois en terme de sécurité et du point de vue commercial. Les connaître permet d'éviter de recontacter le client pour des précisions en cas de manque ou d'oubli, et de perdre le temps associé : *"Ça m'évite de faire des allers retours avec le client"* [AS1].

Plusieurs opérateurs ont remarqué que les clients "voient grand" et souhaitent faire de nombreuses choses avec les drones. Cependant la réglementation, souvent méconnue des clients, impose des limitations par mesure de sécurité. Ces mesures, dans les cas présentant peu de risques, sont normalement bien maîtrisées par les opérateurs et les télépilotes qui disposent de formations théoriques spécifiques. Pour les missions présentant davantage de risques, les évolutions de la réglementation et sa complexité posent quelques difficultés aux opérateurs. Par exemple, les missions en longue élancement pour lesquelles le drone vole à plus de deux kilomètres du télépilote soulèvent actuellement des problèmes, alors qu'un dispositif existait dans la réglementation avant 2021. Dans ces cas complexes, une négociation entre le client et l'opérateur a lieu afin de trouver un compromis entre l'objectif du client et ce qui est possible vis-à-vis de la réglementation. Pour reprendre l'exemple précédent, OP8 a ainsi décidé de réduire l'éloignement maximum de l'aéronef : *"Par exemple, ce ne sera pas quatre kilomètres mais deux kilomètres"*.



FIGURE 4.2 – Adaptation de la zone de vol pour limiter les risques. a) Le client précise une zone à prospecter (contour rouge). b) Les tampons de sécurité autour de la zone croisent des voies rapides et des maisons, créant des risques supplémentaires au sol. c) Proposition de zones d'exploitation restreintes pour maintenir les risques à l'intérieur des installations.

La figure 4.2 illustre un scénario de surveillance automatisée inspiré des exemples de AS2 et OP9. Le client souhaitait une surveillance de l'ensemble des installations qui sont délimitées en rouge (Figure 4.2-(a)). Cette zone pose plusieurs problèmes car des personnes y travaillent, mais aussi parce que les tampons de sécurité, zones entourant la zone de vol, croisent des voies rapides (Figure 4.2-(b)). Ces paramètres imposent de réduire la zone de vol (Figure 4.2-(c)) et de fonctionner lorsque les travailleurs n'utilisent pas les installations, la nuit par exemple. Dans le cas contraire, l'autorité de régulation refusera l'opération.

Il apparaît ainsi important de pouvoir **aligner les besoins du client avec** 1) la faisabilité technique, c'est-à-dire ce que le drone est capable de faire, et 2) la faisabilité du point de vue réglementaire.

Recommandation 1 : Établir le concept d'opération (objectif de la mission,

faisabilité technique et réglementaire) en synchronisation avec le client.

Des difficultés de communication existent potentiellement entre le client et l'exploitant. La négociation et le partage d'informations sont ici des éléments clés. D'après Ellis *et al.* [90], la communication en face à face est la plus efficace, dans un contexte de travail collaboratif. Entre autres, elle permet de négocier, de partager et d'obtenir les informations sans délai. Elle peut contribuer à atténuer les difficultés de communication potentielles entre le client et l'opérateur. Dans le questionnaire, REGHU a commenté que *"cela réduirait les écarts entre les souhaits du client et la faisabilité de la mission en termes de sécurité. Ces écarts entraînent davantage d'itérations avec l'autorité"*. OP8 agréée : *"il y a toujours des aspects dont le client n'est pas conscient, mais il faut être clair avec lui dès le début pour comprendre ce qu'il veut et lui expliquer ce qui est possible (et à quel prix)"*. AS2, qui est resté neutre dans le questionnaire, a déclaré que *"Cela peut être intéressant dans certains cas mais pas toujours applicable"*.

Explorer et affiner les paramètres opérationnels

En décrivant leurs missions, les exploitants ont mentionné les points clés de celles-ci, notamment les caractéristiques de la zone où elle s'est exécutée, au sol et en l'air, ainsi que l'objet de la mission et les difficultés qui en découlent. Tous les interviewés ont mis en avant l'impact des conditions météorologiques, qui peuvent arrêter ou décaler une mission, sauf lorsque les vols ont lieu à l'intérieur d'un bâtiment (AS4). Nous identifions ces propriétés de missions comme des Paramètres Opérationnels ou PO. D'après nos entretiens, il apparaît qu'une **mission peut se décrire par rapport à ses paramètres opérationnels**. Nous pouvons les classer en paramètres subis, c'est-à-dire les moins contrôlés par l'exploitant, allant jusqu'aux paramètres configurables, c'est-à-dire ceux sur lesquels il peut agir. La Figure 4.3 montre certains paramètres opérationnels sur un continuum selon le degré de facilité avec lequel les opérateurs peuvent les ajuster.

Tout d'abord, certains PO définissant l'environnement du système de drone sont indépendants de la mission. Il s'agit des conditions météorologiques (ex : visibilité, vent, température, vent solaire), de l'environnement géographique (ex : densité de population, relief, routes, obstacles et constructions/activités humaines) ou encore de la portion d'espace aérien (ex : type d'espace aérien, zones de drones, zones militaires). Ensuite certains PO sont fixes pour un système de drone donné. Il est question des performances du système, notamment de sa classe, de son niveau d'automatisation, de la portée de la liaison de communication, de la vitesse maximale, de la masse maximale au décollage ou encore du rayon d'action du drone. Enfin certains PO sont dépendants de la mission et doivent être ajustés par l'exploitant. Ces paramètres sont l'exploitation de la charge utile, les trajectoires prévues, l'heure du vol, la vitesse d'évolution, la hauteur d'évolution, les zones de décollage et d'atterrissage, le niveau d'énergie, les mitigations pour la sécurité (réglementations utilisées, moyens de mitigation mis en place) ou encore le descriptif des personnes impliquées dans le vol ainsi

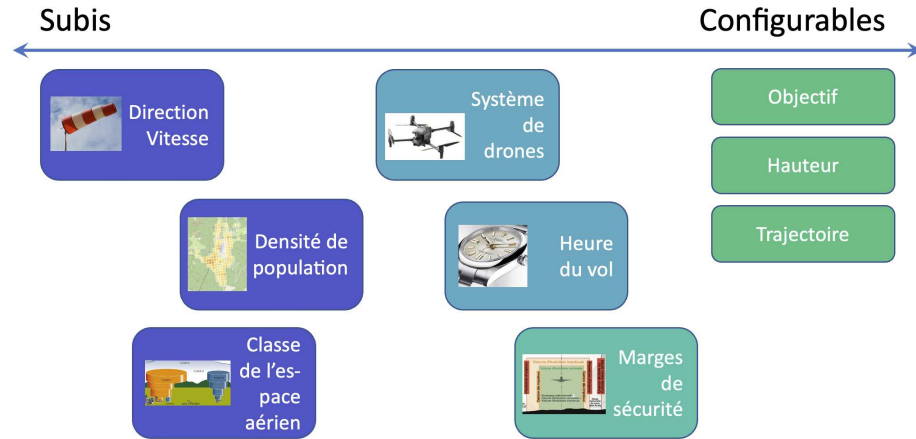


FIGURE 4.3 – Continuum des paramètres opérationnels, allant de *subis* à *configurables*.

que leurs rôles et leurs formations.

Ainsi, de très nombreux PO doivent être considérés par les exploitants. Le but de ces derniers est d'identifier les valeurs des paramètres opérationnels importants pour la mission et de négocier pour trouver un accord avec le client le cas échéant. Cette négociation implique de pouvoir évaluer rapidement les possibilités par rapport à la réglementation ainsi que le risque opérationnel, et de parvenir à proposer des alternatives si nécessaire. À ce propos, OP8 explique : *"Il y a deux interfaces en fait, une avec le client et l'autre avec le régulateur et nous on est au milieu. On recueille les exigences du client et on essaie de faire une première barrière, avant d'envoyer n'importe quelle demande au régulateur. Pour garder notre crédibilité, on les force à revoir à la baisse leur souhait. On leur dit qu'on ne soumet même pas cette demande parce que sinon on risque de se faire jeter."*

Ce travail peut s'effectuer au même moment que le recueil de besoins avec le client, et avec les mêmes outils, mais l'exploitant peut aussi s'en charger seul plus tard. L'enjeu pour les opérateurs est de **délimiter le périmètre de la mission, de le décrire suffisamment pour éviter les allers-retours et les oublis, et d'être prêt à le revoir à la baisse en cas de négociation due aux aspects concernant la sécurité.**

Recommandation 2 : Utiliser systématiquement les paramètres opérationnels pour décrire une mission.

Nous recensons ici les PO qui ont été évoqués durant les entretiens. Ils permettent de standardiser les propriétés des opérations et être utilisés par des outils automatisant le calcul de leur impact sur la sécurité tels que des cartes de risques au sol à partir des caractéristiques du drone et des trajectoires envisagées [227]. Les paramètres les plus récurrents sont : l'éloignement avec le

pilote de sécurité qui détermine la nature du vol (en vue, hors-vue), l'objectif du vol qui déterminera les trajectoires, la hauteur d'évolution de l'aéronef et les obstacles qui servent aussi à calculer les marges de sécurité, la vitesse du vol, les heures et le lieu du vol qui servent à connaître si l'environnement est peuplé ou non. Il est cependant impossible de lister tous les paramètres possibles d'une mission de drone dans cette étude car chaque mission est spécifique, et particulièrement dans les cas étudiés. Ainsi, ce sera à l'exploitant d'identifier les paramètres opérationnels qui seront le plus utiles et pertinents pour sa mission, quitte à en ajouter si nécessaire.

OP0 a commenté que *"les PO permettent de parler en termes clairs, précis et communs à tous (client, opérateur, régulateur)"*. Cependant, il est impossible de dresser une liste exhaustive de tous les PO possibles d'une mission de drone en raison de leur grande diversité, comme l'ont indiqué AS3 : *"Aucune mission ne se ressemble"* et AS2 *"il est difficile, lors d'une mission, de prévoir tous les paramètres opérationnels"*.

Prendre connaissance des démarches à effectuer

Une fois le Conops déterminé, les exploitants doivent décider des mesures de sécurité qui seront nécessaires pour obtenir l'autorisation d'exploitation. Les PO permettent à l'exploitant d'identifier les démarches à réaliser. Une fois définis, grâce à son expertise, l'opérateur les compare avec ce que permet la réglementation.

La réglementation détermine les cas où une demande d'autorisation d'exploitation en catégorie spécifique est nécessaire [59]. Celle-ci doit inclure une étude de sécurité. Avant de faire cette demande d'autorisation d'exploitation, qui est considérée comme une étape chronophage et difficile par tous les participants à nos entretiens, les opérateurs ont d'autres options.

D'après OP2, *"le régulateur recommande de vérifier au mieux s'il y a d'autres moyens de soumettre nos demandes par une déclaration simple via les scénarios nationaux ou par un Predefined Risk Assessment avant de faire une demande d'autorisation d'exploitation en catégorie spécifique avec une SORA"*. Pour AS2, il y a parfois des problèmes dus à des erreurs d'interprétation : *"Il y en a qui croient qu'ils sont en OPEN alors que ce qu'ils font c'est du SPECIFIC, mais ils ne le savent pas car ils interprètent mal la réglementation"*.

Les participants ont signalé l'utilisation d'outils en ligne tels que Clearance [56], Fly By [85], ou Drone Keeper [144] pour identifier les restrictions et procédures applicables aux drones à partir de formes dessinées sur une carte. Toutefois, bien que AS2 ait déjà essayé ce type d'outil, il a arrêté de s'en servir à cause de problèmes d'interaction humain-machine : *"Je ne le trouve pas ergonomique du tout, il me fait perdre du temps"*. Enfin, OP7 a quant à lui été aidé par une société de services pour cette activité.

Un problème majeur pour les opérateurs est de savoir identifier la situation par rapport au cadre réglementaire afin de connaître les démarches à effectuer par la suite. Il est souvent nécessaire de posséder une expertise pour maîtriser

toutes les situations. De plus, cette réglementation est composée de la loi européenne et des lois nationales qui peuvent être amendées ou qui peuvent évoluer. Cela complique davantage la situation.

Recommandation 3 : À partir des paramètres d'une mission, soutenir l'identification des éléments de la réglementation concernant l'opération.

Tous les répondants au questionnaire ont approuvé cette recommandation. OP0 a commenté que *"cela pourrait éviter de perdre du temps sur un concept exhaustif qui ne passera pas la barrière de la réglementation"*, AS2 a souligné qu'elle serait très utile, *"surtout si elle peut guider vers l'application la plus appropriée (scénario ou SORA)"*. La recommandation est partiellement mise en œuvre par les outils en ligne cités [56, 85, 144] qui donnent une liste des protocoles d'accords nécessaires pour opérer au-dessus d'une zone définie, tel que le contrôle du trafic aérien pour un aéroport, mais ne fournissent pas les exigences de sécurité pour une mission complexe.

4.2.3 Évaluer et maîtriser les risques opérationnels

Tous les exploitants interviewés en 2020 (OP1, OP2, OP3, OP4) se préparaient à utiliser la SORA sauf OP4 qui n'en avait pas encore entendu parler. Les opérateurs et les accompagnateurs interviewés courant 2021 l'utilisent tous sauf OP7 qui s'est fait aidé par un accompagnateur.

Un processus itératif et créatif

Pour établir une évaluation des risques, plusieurs opérateurs ont indiqué utiliser un processus itératif. Par exemple, SC1 et SC2 ont utilisé des outils en ligne tels que les systèmes d'information géographique pour obtenir une approximation rapide des risques avant de traiter progressivement les détails par eux-mêmes. D'autres ont utilisé des outils développés en interne ou des feuilles de calcul spécifiques pour les aider à évaluer les risques opérationnels : pour automatiser les calculs et évaluer les zones de retombées au sol, les lignes de vue et les profils d'élévation (OP1, OP3, OP6, OP8, OP9). AS2 a déclaré avoir utilisé un outil en ligne [150] pour esquisser et valider rapidement le calcul du niveau de risque mais s'oblige à le refaire en détail dans une deuxième phase. Les tâches consistent à rassembler toutes les informations précises concernant les paramètres opérationnels et à réaliser les étapes de la SORA. Ces étapes sont les suivantes : écrire un concept d'opérations, évaluer le risque sol et trouver des moyens pour en limiter les impacts, évaluer le risque air et trouver des moyens pour en limiter les impacts à l'aide de mesures d'atténuation stratégique et tactique, déterminer le niveau d'assurance et d'intégrité final qui correspond au niveau de risques de l'opération, déterminer les objectifs de sécurité opérationnelle qui en découlent, et enfin, étudier les zones adjacentes de l'espace aérien. De plus, il faut apporter les justifications nécessaires à chacune des étapes.

L'analyse de risque et la recherche de solutions pour les limiter est un processus créatif comme souligné par RG2 : *"Oui. (...) il faut être aussi créatif que*

les gens d'en face [NDLA : c'est-à-dire les opérateurs]". Cela a posé problème à OP9 qui a expliqué que *"SORA est très factuel, mais vous pouvez y répondre de vingt-cinq façons différentes. Il n'y a pas de solutions, pas de chiffres, et surtout, vous devez expliquer pourquoi votre solution répond au problème"*. Justifier pourquoi la proposition est appropriée est l'un des défis de la méthodologie SORA. OP3 a déclaré que *"SORA est un outil qui vise à évaluer le niveau de sécurité de l'opération, et donc vous devez être capable de le justifier à vous-même et ensuite être capable de le justifier à l'autorité. Ce sont deux choses différentes"*.

L'atténuation dépend des choix de l'opérateur et quelques petits détails peuvent tout changer dans le résultat. L'exhaustivité est impossible car il peut y avoir différentes stratégies pour un même risque. Selon OP6, *"Il est facile pour une mission de devenir inutilement compliquée après un changement de paramètres"*. Les opérateurs doivent trouver leur atténuation optimale et, ce faisant, ils doivent répéter encore et encore les étapes d'ajustement du PO et de calcul du niveau de risque pour chaque atténuation potentielle. Il est important de **laisser le choix de l'ordre de réalisation des étapes de l'évaluation des risques**. En tant que processus créatif, forcer un engagement précoce peut être préjudiciable pour la qualité des solutions [252]. Par exemple, contrairement aux autres opérateurs, AS3 a indiqué qu'il commençait par ce qu'il trouve le plus difficile : *"si l'environnement aérien est complexe et que nous nous rendons compte au premier coup d'œil qu'au niveau territorial nous allons être dans une zone agricole, nous garderons l'aspect terrestre (qui est plus facile à aborder) pour la fin"*.

Plusieurs opérateurs (OP3, OP5, OP8, AS1, AS2, AS4) sont convaincus qu'une approche exploratoire peut les aider à trouver le bon équilibre entre le niveau de sécurité et le travail requis en termes de procédures. Cette activité peut aussi se faire de façon synchrone avec le client. En effet, dans le cas des accompagnateurs (OP10, AS1, AS2, AS3, AS4), c'est le client, lui-même opérateur de drone, qui ira soumettre une demande d'autorisation d'exploitation. Il devra donc maîtriser les paramètres opérationnels de la mission.

Recommandation 4 : Soutenir l'exploration des paramètres opérationnels et estimer leurs impacts sur la sécurité de la mission.

REGHU est totalement d'accord avec la recommandation et a commenté que *"cela aiderait certainement les opérateurs à explorer les options qui pourraient simplifier leurs procédures tout en améliorant la sécurité de leurs opérations. Ce travail est souvent effectué pendant l'examen de la demande par l'autorité, mais il augmente le temps et la charge de travail de chacun (opérateur et autorité)"*. AS2 ajoute qu'*"il serait très utile de pouvoir tester les paramètres qui peuvent être modifiés pour qu'une opération s'inscrive dans un niveau de risque donné"*. Des travaux récents ont utilisé une approche similaire permettant de calculer des trajectoires de drones résistantes aux incertitudes météorologiques à partir de la déclaration formelle des PO [266].

Il faut noter que cette recommandation nécessite que les PO aient été identifiés et utilisés comme suggéré par RC2.

Des données disponibles mais peu fiables

Les exploitants récupèrent et exploitent des cartographies disponibles en version papier et sur internet via différents services publics et privés. Ces cartographies concernent principalement la densité de population, les vues satellites du lieu de la mission, le relief, les informations aéronautiques comme les classes d'espace aérien, la proximité et les limites des aéroports. Des informations supplémentaires peuvent être chargées sur la carte, selon la mission, comme les infrastructures à inspecter pour OP5, les zones à surveiller pour AS3 ou les espaces aériens pour AS2. AS4 et OP5 utilisent des données fournies par le client. OP3 indique se référer aux images satellites pour son étude sans faire le déplacement si le site est très éloigné, alors que AS3 insiste sur l'obligation de faire une visite du lieu, dont il peut se servir pour négocier avec le régulateur. Les interviewés ont tous exprimé des inquiétudes par rapport à la fiabilité des données disponibles. D'après AS1, l'utilisation d'un outil centralisant les données nécessaires serait utile car : *"déjà avoir toutes les informations c'est un tiers du boulot, on gagnerait un temps considérable"*. AS4 ne connaît pas les outils privés en ligne qui fournissent les services de cartographie mais fait tout le travail depuis le début, alors que la plupart des autres interviewés les ont utilisés au moins une fois pour essayer. OP5 et AS2 émettent une réserve par rapport aux données disponibles en ligne, en ce qui concerne leur fiabilité : sont-elles à jour ? Sont-elles complètes ? Sont-elles correctes ? En effet, ces données et outils disponibles en ligne pour ces cartographies ne sont pas reconnues officiellement et leurs éditeurs se dégagent de la responsabilité de l'usage des services. Seuls les services proposés par un organisme de l'État sont considérés comme fiables par le régulateur et les exploitants. Les opérateurs confirment que l'accès aux données de performance du système de drones est facilité pour les constructeurs (OP2, OP6, OP8, AS2) ou si il existe des liens forts entre les constructeurs et l'exploitant (OP1, OP5, OP9, AS4).

Un enjeu important est l'**accès aux données pertinentes et fiables** pour effectuer l'évaluation des risques opérationnels. Pour illustrer, sur la densité de la population OP8 expliquait que *"la définition de Sparsely populated n'est donnée nulle part, il y a un vide réglementaire"* ; ce qui est confirmé par AS2 : *"Où obtenons-nous les critères pour déterminer la densité de la population ? Qui doit décider des seuils ?"* Comme résumé par OP5 : *"Ce qui est hyper important, c'est qu'à terme, que l'autorité valide ou reconnaisse certains outils comme étant des outils utilisables. Et qu'il y ait un tampon (du régulateur) ou un label (du régulateur) et que si on utilise ces outils-là, hé ben voilà, on parle le même langage, on sait que les bornes sont bien définies dans l'outil par l'autorité et voilà. Parce que si à chaque fois qu'on utilise un outil différent il faut aller représenter à l'autorité, ré-expliquer, redéfinir les seuils ensemble, ça c'est compliqué"*.

Recommandation 5 : Développer des outils utilisables pour soutenir la production de données fiables du point de vue du régulateur ou l'atténuation des données non fiables.

Le régulateur doit pouvoir lister et/ou fournir des sources de données fiables et aux formats directement exploitables ou des outils considérés comme fiables. En contrepartie, les exploitants devront s'appuyer sur les sources et/ou des outils validés par le régulateur pour résoudre le problème de fiabilité des données.

Tous les répondants au questionnaire ont approuvé la recommandation et se sont montrés très concernés, comme l'indiquent les résultats prioritaires. Cependant, REGHU a fait le commentaire suivant : *"C'est une ambition tout à fait louable, mais ce n'est pas la vocation de l'autorité de produire ces outils unifiés. Tous les outils, certes "dispersés", sont accessibles gratuitement via des sources publiques : cartes de navigation OACI, statistiques de densité de population INSEE, etc."*

Analyse géovisuelle

Après avoir décrit et quantifié les PO, les participants ont expliqué qu'ils ont produit des cartes pour représenter l'opération. La carte sert d'outil de communication, avec le client ou le régulateur, mais aussi d'outil de réflexion visuelle exposant certains problèmes de sécurité potentiels, comme les zones habitées à proximité ou les tampons dépassant le périmètre de l'opération, comme l'illustre la figure 4.2. Les opérateurs ont été unanimes pour dire que l'utilisation de cartes est essentielle lors de l'évaluation des risques opérationnels. Les cartes peuvent être utilisées pour déterminer les conséquences d'une opération à un certain endroit et cette pratique est très répandue chez les opérateurs. RG2 a indiqué qu'ils demandaient souvent une visualisation tridimensionnelle des trajectoires sur une carte pour mieux comprendre le profil d'élévation par rapport au relief de la zone.

Les cartes utilisées par les participants étaient soit des versions en papier, soit des versions numériques avec des couches de données supplémentaires telles que des points d'intérêt et des polygones. Les participants ont expliqué utiliser plusieurs sources de données, souvent au sein de différentes applications pour retrouver des éléments tels que le profil d'élévation, la densité de population ou pour localiser des pylônes ou des antennes qui pourraient se trouver sur le chemin. Des outils existent mais ils sont séparés de l'analyse faite sur la carte et dans ce cas des allers-retours entre les outils doivent être faits. Les cartes utilisées actuellement ne sont pas vraiment interactives, dans le sens où les données sont statiques et ne sont pas aisément manipulables par l'utilisateur final sauf pour l'importation/exportation/visibilité des couches, la création de polygones ou d'autres formes. Le travail se fait souvent seul comme le décrivent les exploitants, alors que certaines entités peuvent disposer de plusieurs personnes pouvant le faire. Le régulateur réclame une carte de la future opération en tant que pièce constitutive du dossier de demande d'AESC et en utilise une pour sa vérification. Lorsque nous avons évoqué la possibilité de réaliser des études de sécurité directement sur une carte en dessinant des trajectoires ou en annotant les risques, tous les participants ont répondu positivement. Plusieurs ont expliqué que le fait de pouvoir dessiner les trajectoires et de visualiser automatiquement les éléments de sécurité tels que les tampons de sécurité ou de superposer plu-

sieurs couches de données soutiendrait activement leur processus. AS2 a évoqué *"un objet graphique qui nous permet de garder en vue tous les paramètres que l'on va modifier légèrement, et de voir l'impact que cela a concrètement sur le calcul de mon risque aérien ou le calcul de mon risque terrestre afin que je puisse voir le niveau de risque évoluer en me disant : "En fait, il suffisait que je baisse mon altitude de cinq mètres et je passais à un 'SAIL 2' et je n'avais pas besoin de modifier tous les autres paramètres".*

Recommandation 6 : Soutenir la représentation et de la manipulation des paramètres opérationnels sur les cartes.

Les représentations cartographiques sont largement utilisées par les opérateurs durant toutes les phases d'une mission mais restent sous-utilisées lors de l'analyse de la sécurité, comme vu dans la RSL. Sur la base de cette recommandation, nous avons exploré, dans le cadre de l'étude longitudinale avec OP0, comment la manipulation des PO sur les cartes pouvait améliorer l'identification des risques en contexte et la formulation de mesures d'atténuation adéquates - objet du chapitre suivant. Nos résultats suggèrent que l'analyse géovisuelle des tampons de sécurité associés aux trajectoires des drones a permis d'ajuster les trajectoires pour réduire les risques, ce qui renforce la validité de la recommandation.

Stratégies d'accélération

Les participants disent tous que la SORA est chronophage. AS1 a déclaré avoir travaillé sur une SORA pendant près d'un an lors d'une mission d'inspection de site nucléaire. Il a expliqué que : *"le temps moyen pour faire un SORA est de 100 à 150 heures de travail"*. Avec l'expérience, la méthodologie est exécutée plus rapidement. Par exemple, OP6 a déclaré que cela lui prenait entre deux jours et deux semaines. Selon OP5, *"Quelque chose de finalisé est plus comme une semaine de travail"*. Les opérateurs (OP5, OP6) qui ont décrit des durées plus courtes ont plus de 20 ans d'expérience dans l'exploitation d'hélicoptères. Pour tous les opérateurs ayant une expérience/expertise dans l'aviation pilotée (OP1, OP2, OP3, OP5, OP6, OP8, OP9, AS1, AS3, AS4) sauf un (AS4), le processus est considéré comme abordable.

Certains opérateurs ont développé des stratégies pour accélérer l'évaluation des risques opérationnels et la production des fichiers demandés. Pour OP8, OP9 et AS1, certains calculs sont automatisés dans un tableur. OP10 et AS1 réutilisent la même structure de document, en ayant standardisé le processus depuis le recueil de besoin dans des outils bureautiques avec des macros intégrées. La génération des éléments de la SORA en est facilitée. **L'automatisation de certaines tâches** peut aider à accélérer l'activité.

Au lieu de cela, OP8 a créé un concept d'opérations générique sans spécifier les emplacements exacts mais en conservant les caractéristiques importantes sur le plan opérationnel. La réalisation du SORA a consisté à vérifier la différence entre l'étude de sécurité générique et la situation réelle. La réutilisation de parties d'études réalisées précédemment est similaire au concept d'évaluation des

risques prédéfinis (PDRA) encouragé par le régulateur, avant de réquerir à une SORA complète. OP2 a évoqué *"un outil rêvé qui aiderait à la réalisation d'une SORA pré-écrite un peu comme une PDRA, plus simple et plus rapide à remplir et à envoyer au régulateur"*.

Les nombreuses itérations entre les opérateurs et le régulateur pour les changements requis créent des problèmes. Les régulateurs doivent être capables de reconnaître les différentes versions d'un dossier pour voir si l'ajustement nécessaire pour l'atténuation des risques ou les clarifications demandées ont été apportés. Pour RG2, il s'agit d' *"éviter les quiproquos. 'Votre zone tampon, la dernière fois qu'on s'était vu, on s'était dit qu'elle était pas bonne, je n'ai pas l'impression qu'elle ait bougé' "*.

Recommandation 7 : Fournir des gabarits réutilisables et exploiter les concepts de chaînes éditoriales : permettre la gestion des versions ; automatiser l'inclusion d'éléments, mettre à jour les liens entre les éléments puis pour générer les documents requis.

Les gabarits ou modèles de documents doivent permettre d'accélérer le processus et les tâches répétitives. Par exemple, RG2 a suggéré d'harmoniser les présentations SORA : *"Si tous les SORA se ressemblaient, l'évaluation irait beaucoup plus vite"*. AS2 a suggéré dans le questionnaire de *"laisser la possibilité de proposer un 'modèle' de mission en fonction des dossiers déjà réalisés car un opérateur réalise souvent des missions très similaires"*. Cependant, l'accélération ne devrait pas nuire à la sécurité. Par exemple, OP0 a commenté que *"la clarté du contenu des documents doit passer en premier"* et REGHU a commenté que *"une procédure ou un outil n'est pas la réponse à tous les problèmes : il est tout à fait possible de remplir incorrectement un modèle de document très bien conçu"*. En ce qui concerne la gestion des versions, OP8 et OP10 ont réutilisé des documents précédemment acceptés et ont signalé les différences au régulateur pour accélérer le traitement. OP10 a expliqué que *"lorsque nous leur envoyons le fichier, nous décrivons la différence par rapport à la transaction précédente"*.

4.2.4 Obtenir une autorisation d'exploitation

Le dossier de demande d'autorisation d'exploitation doit être transmis au régulateur mais il contient différentes pièces dont des autorisations d'autres tiers, comme les préfetures et les gestionnaires d'aéroports.

De multiples acteurs et des délais multiples

Les participants ont expliqué que les opérations impliquant plusieurs parties prenantes nécessitaient souvent beaucoup d'efforts de coordination.

Ils devaient communiquer avec chacune des tierces parties pour les informer et aussi pour obtenir leurs approbations pour opérer le cas échéant. En fonction des zones et des risques présentés, il est nécessaire d'obtenir l'accord de différents acteurs tels que les propriétaires fonciers, les contrôleurs aériens, la préfecture ou les militaires pour certaines zones. D'après OP8, *"Les militaires opèrent en*

même temps que nous, donc là il y a un protocole d'accord dans lequel on se partage l'espace". Les outils utilisés sont le courrier électronique, le téléphone et les services en ligne tels que [71], Drone Keeper [144], Clearance [56] et U-Space Keeper [145].

L'obtention d'informations sur les points de contact, les éléments à fournir et les délais reste un défi majeur pour plusieurs opérateurs. La plupart des demandes comportent des délais de préavis et de traitement qu'il faut gérer. Le fait de ne pas les fournir au régulateur peut retarder, voire faire annuler une opération. SC2 a expliqué que *"c'est toujours lorsque le régulateur vous demande le papier que vous réalisez que vous ne l'avez pas"*.

Recommandation 8 : Soutenir l'identification anticipée des tiers, des protocoles et des délais pour les autres autorisations requises.

Bien qu'ils ne couvrent pas intégralement le territoire, les outils cités précédemment implémentent partiellement cette recommandation, et en cela la consolident.

Tous les répondants au questionnaire ont approuvé cette recommandation. REGHU ajoute que : *"certains outils en ligne (éventuellement payants) le proposent et semblent être appréciés par les opérateurs. Une mise en garde s'impose toutefois : un tel outil ne peut fournir des informations utiles aux opérateurs que si les paramètres d'entrée (par exemple, l'emplacement, la hauteur, l'heure) sont correctement renseignés par les opérateurs"*. AS2 a souligné les difficultés possibles pour rendre la recommandation opérationnelle, car *"les délais varient en fonction des demandes ou des saisons"*.

Communiquer et négocier avec le régulateur

Les fichiers doivent être soumis par courriel au régulateur trois mois avant la date prévue de l'opération. Tous les opérateurs ont rencontré des difficultés en raison des limites de taille des fichiers joints dans l'e-mail du régulateur. OP9 a été contrarié par le fait que *"étant donné le nombre de documents, il est impossible qu'ils tiennent dans 3MB"*. Des opérateurs se sont appuyés sur des services externes de transfert de fichiers (OP8, OP9, OP10, AS3) ou sur des solutions d'hébergement privé pour laisser les documents à la disposition du régulateur pendant de longues périodes (OP8, AS4).

À la réception d'une demande, les équipes du régulateur font une pré-analyse du dossier. Cela leur permet de vérifier si toutes les étapes de la SORA sont présentes, ainsi que les points clés comme la densité de population, le risque air et le calcul de la dimension des zones tampons. Ils font ensuite un premier retour au soumissionnaire, avant de passer aux détails comme expliqué par RG2 : *"l'idée c'est de voir déjà dans un premier temps et en général, c'est sous une à deux semaines, de voir si il y a vraiment des points qui sont rédhibitoires. S'il n'y a rien qui nous saute à la figure, on répond à l'exploitant que l'on va continuer à instruire le dossier puis on va commencer à regarder les détails"*. Pour les cas problématiques, l'objectif est de réduire la charge de travail pour les deux côtés comme expliqué par RG2 : *"On fait travailler beaucoup de gens à la fois chez*

nous et chez eux, pour rien. Si on sait que l'opération, elle n'est pas faisable à la fin, il faut qu'on se rende compte assez vite quand même". Toutefois, il est **conscient qu'il n'existe pas d'outil intégré** pour réaliser toutes ces tâches. *"En fait, on jongle en fonction des outils" [RG2].*

Dans la plupart des cas, des précisions sont nécessaires et le régulateur les demande à l'exploitant par courriel. L'exploitant y répond en fournissant les informations requises jusqu'à ce que les deux parties soient satisfaites par le niveau de sécurité exigé et ses justifications. Seul OP8 a indiqué avoir réussi à obtenir une seule fois une autorisation d'exploitation spécifique sans demande de précision par le régulateur. Ces itérations pour demander des précisions se font jusqu'à ce que le régulateur soit satisfait des mesures prises pour assurer la sécurité de l'opération. D'après AS2, il a fallu *"trois mois pendant lesquels on va avoir des échanges avec le régulateur pour finaliser le dossier"*. Parfois le délai maximal de trois mois avant l'opération n'est pas respecté. OP10 a expliqué qu'il a dû annuler un vol à cause d'une AESC qui n'a pas été délivrée à temps.

Les opérateurs (OP9, OP10, AS2, AS3, AS4) ont expliqué qu'ils n'avaient aucune information sur le statut de leur demande jusqu'à ce que le régulateur leur réponde par email. Certains ont expliqué qu'ils ont contacté le régulateur par téléphone pour vérifier si le dossier est valide avant de l'envoyer (OP9), pour l'informer qu'une soumission a été faite (OP9, AS2), pour évaluer les modifications nécessaires (AS2) après l'avoir envoyé ou pour s'informer du statut de la soumission (OP10, AS4). Les opérateurs cherchaient tous à connaître le statut de leurs soumissions, surtout quand la date limite de l'opération approchait.

Certains opérateurs avaient des stratégies de communication spécifiques. Par exemple, AS2 a appelé le régulateur pour faire un "pitch" oral de la mission afin d'obtenir un retour rapide. Certains ont également expliqué que le travail est plus facile lorsque le régulateur et l'opérateur ont déjà travaillé ensemble dans le passé. Pour AS3, *"le régulateur était très prudent au début, mais il s'est progressivement détendu à mesure que nous présentions des dossiers SORA bien faits"*.

Recommandation 9 : Permettre à toutes les parties prenantes de prendre conscience de l'état actuel de la demande.

En effet, la visibilité du statut du document est une préoccupation pour tous les opérateurs, et seuls ceux qui sont plus habitués à traiter avec le régulateur osent appeler pour s'en enquérir (OP9, OP10, AS3). Fournir des informations telles qu'un accusé de réception, un numéro dans la file d'attente et le statut actuel de la demande permettrait aux opérateurs de mieux estimer l'avancement de leurs demandes.

Tous les répondants sont d'accord avec la recommandation, à l'exception de AS2 qui n'est pas certain que l'administration puisse donner ce type d'indication sur l'état d'avancement.

4.2.5 Accord sur les recommandations et évaluation des priorités

En plus de l'accord avec les 10 recommandations initiales (figure 4.4), nous avons recueilli les choix de priorisation des répondants (figure 4.5) et des commentaires supplémentaires pour raffiner les recommandations.

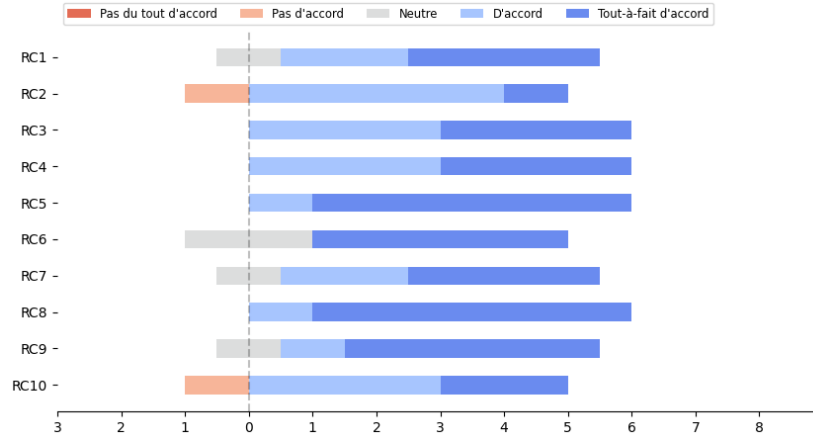


FIGURE 4.4 – Histogramme horizontal empilé du niveau d'accord pour chaque recommandation

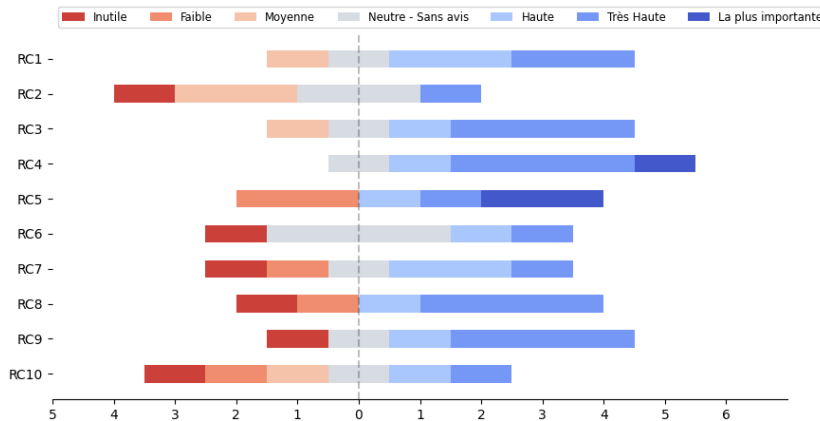


FIGURE 4.5 – Histogramme horizontal empilé de la priorisation des recommandations

Toutes les recommandations ont été évaluées positivement, comme le montre la figure 4.6-(a). Les recommandations RC4 et RC8 ont obtenu les niveaux d'accord les plus élevés parmi tous les répondants, avec l'écart-type le plus faible.

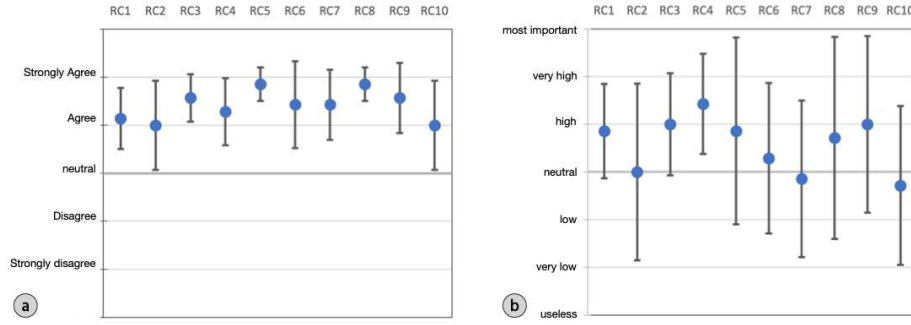


FIGURE 4.6 – a) Score d’accord moyen et écart-type pour chaque recommandation. b) Score de priorité moyen et écart type pour chaque recommandation.

Les résultats du classement par priorité sont aussi illustrés dans la figure 4.6-(b). En utilisant la moyenne, nous avons pu classer les priorités dans l’ordre suivant, de la priorité la plus importante à la moins importante : RC4, RC3, RC9, RC1, RC5, RC8, RC6, RC2, RC7, et RC10.

4.3 Discussion

4.3.1 Un meilleur soutien pour une activité complexe

Les résultats de nos entretiens montrent que le processus de préparation de la mission est beaucoup plus riche et complexe que le processus prescrit. De nombreuses tâches, souvent longues et nécessitant plusieurs itérations, sont nécessaires entre les besoins du client et l’établissement d’un concept d’opération minimisant les risques et acceptable par le régulateur. Cette constatation est conforme à l’étude antérieure de Ljungblad *et al.* [181]. Cependant, alors qu’ils se concentraient sur les implications de l’IHD du point de vue des pilotes, nous nous sommes plutôt intéressés aux phases préparatoires et au soutien à la sécurité en tant que processus collaboratif impliquant de multiples acteurs.

Nous avons initialement élaboré 10 recommandations pour un meilleur soutien à la sécurité des opérations et à l’utilisabilité des systèmes. Elles ont toutes été évaluées positivement et consolidées par certains opérateurs et régulateurs. Nous avons fusionné RC7 et RC10, couvrant les aspects liés aux stratégies d’accélération soit pour l’étude de la sécurité, soit pour la communication avec l’autorité, sur la base de leurs similitudes et du retour d’information des répondants. L’ensemble final des neuf recommandations est le suivant :

- RC1 : Établir le concept d’opération (objectif de la mission, faisabilité technique et réglementaire) en synchronisation avec le client.
- RC2 : Utiliser systématiquement les paramètres opérationnels pour décrire une mission.

- RC3 : À partir des paramètres d'une mission, soutenir l'identification des éléments de la réglementation concernant l'opération.
- RC4 : Soutenir l'exploration des paramètres opérationnels et estimer leurs impacts sur la sécurité de la mission.
- RC5 : Développer des outils utilisables pour soutenir la production de données fiables du point de vue du régulateur ou l'atténuation des données non fiables.
- RC6 : Soutenir la représentation et de la manipulation des paramètres opérationnels sur les cartes.
- RC7 : Fournir des gabarits réutilisables et exploiter les concepts de chaînes éditoriales : permettre la gestion des versions ; automatiser l'inclusion d'éléments, mettre à jour les liens entre les éléments puis pour générer les documents requis.
- RC8 : Soutenir l'identification anticipée des tiers, des protocoles et des délais pour les autres autorisations requises.
- RC9 : Permettre à toutes les parties prenantes de prendre conscience de l'état actuel de la demande.

4.3.2 Un équilibre à trouver entre sécurité et automatisation

Plusieurs recommandations que nous avons formulées visent à offrir des solutions pour **automatiser des parties du processus** qui ont été jugées trop longues, trop complexes et sujettes aux erreurs par les opérateurs et les régulateurs. L'utilisation systématique des paramètres opérationnels (RC2) au sein de modèles ou d'outils adéquats (RC7) peut créer des opportunités d'automatiser certains aspects de l'analyse de sécurité tels que l'identification des dangers ou l'impact de l'opération sur la sécurité (RC3, RC8). Tous les participants ont mentionné **la difficulté que représente la récupération de données fragmentées** dans plusieurs outils et bases de données. La combinaison de ces sources et la mise en place d'une interaction pour faire face à des données éventuellement erronées (RC5) réduiraient le temps de travail des opérateurs et des régulateurs. En raison de sa nature itérative, le processus d'analyse de la sécurité bénéficierait grandement des outils de gestion des versions ou de l'automatisation des mises à jour entre les documents liés (RC7).

Si l'automatisation peut considérablement accélérer le processus, elle pourrait présenter des risques pour la sécurité. Comme l'a expliqué RG2, le risque avec les formulaires en ligne facilitant l'application de la méthodologie SORA est que les opérateurs pourraient être tentés de **"remplir le modèle au lieu de réfléchir"**. Les outils forçant un engagement prématuré et ne laissant pas l'utilisateur essayer et explorer les solutions potentielles peuvent être préjudiciables à la qualité de la solution choisie [252].

4.3.3 Un équilibre à trouver entre sécurité et objectifs commerciaux

Nos participants ont expliqué être fréquemment confrontés à de nouvelles demandes de la part de leurs clients. Dans de tels cas, trouver un équilibre optimal entre les préoccupations de sécurité et les objectifs commerciaux exige de la **créativité et un esprit critique**. De façon pragmatique, si une demande d'AESC n'aboutit finalement pas, des ressources de la part de toutes les parties prenantes auront été gaspillées. De plus, détecter les problèmes potentiels très en amont permettent d'amoinrir le coût des modifications ou d'optimiser l'opération. Plus une mission est ambitieuse (voler en milieu urbain, franchir plus de distance, utiliser davantage de drones, etc), plus il y aura de risques à gérer et plus le processus sera complexe. C'est la raison pour laquelle les opérateurs servent de filtre par rapport aux besoins du client et essaient de ramener ce dernier à des objectifs à la fois réalistes et faisables, par rapport à la technique et surtout la réglementation. Le commentaire de OP8 l'illustre parfaitement : *"il y a toujours des aspects dont le client n'est pas conscient, mais il faut être clair avec lui dès le début pour comprendre ce qu'il veut et lui expliquer ce qui est possible (et à quel prix)".* A la fin du processus, c'est le régulateur qui a le dernier mot car la sécurité prime avant la réussite commerciale. Si le régulateur a expliqué qu'il accueillait positivement toute nouvelle opération, ce qui a été confirmé par les opérateurs, ces derniers ont également indiqué que faire face à de **nouvelles situations entraînait un surcroît de travail pour évaluer la sécurité** et augmentait souvent les exigences du régulateur.

En soutenant l'analyse et la prise de décision, il est possible d'améliorer l'évaluation et l'atténuation des risques opérationnels, ce qui conduit à des opérations plus sûres tout en maintenant le système utilisable. Nous pensons que les outils favorisant l'exploration systématique des paramètres opérationnels (RC4) et tirant parti de l'analyse visuelle sur les cartes (RC6) pourraient aider les opérateurs à explorer davantage l'espace de conception et à utiliser le raisonnement spatial. Des approches combinant l'exploration avec des connaissances aéronautiques spécifiques et l'identification des réglementations adéquates du PO pour accélérer le processus devraient être étudiées dans des travaux futurs comme moyens d'augmenter le processus de décision [91].

4.3.4 Une activité collaborative

Le processus de préparation de la mission du drone est une activité collaborative qui implique les trois aspects de la communication, de la coordination et de la production [84]. Son résultat est la *production* d'un fichier dont le contenu doit donner confiance au régulateur en ce qui concerne la qualité de l'atténuation des risques. Même si l'opérateur est responsable de la composition de ce dossier, sa production est partagée avec le client, et même avec le régulateur lorsque l'opérateur est d'accord avec le régulateur sur certains aspects du dossier. Ceci montre que le processus prescrit de production du dossier par l'opérateur seul n'est pas le processus réel et que les acteurs doivent passer par des activités de

conception commune pour établir efficacement les meilleures dispositions pour la mission (RC8). Nous pensons que le soutien de cette activité de production partagée est important pour l'efficacité et la qualité du résultat, et devrait faire l'objet de travaux futurs (RC7). Ceci est en accord avec Pan et Hildre qui plaident pour un travail plus collaboratif pour la sécurité et la gestion des risques [213].

En outre, il existe une tension entre les objectifs commerciaux du client, les objectifs opérationnels de l'exploitant et les objectifs de sécurité du régulateur. La qualité du résultat mentionné ci-dessus doit être mesurée par rapport à ces objectifs. Un travail reste à faire pour caractériser le niveau de qualité du résultat, et pour évaluer dans quelle mesure les nouveaux services interactifs que nous ou d'autres chercheurs pourraient proposer l'atteignent.

La constitution du dossier nécessite une *coordination* entre les acteurs, et nous avons observé qu'elle était mal supportée par les outils actuels, notamment sur le statut des analyses du régulateur (RC9). Il semble nécessaire de proposer des outils offrant un tel support, ce qui permettrait à tous les acteurs de mieux s'organiser et d'avoir une conscience partagée du niveau d'acceptation d'une mission.

Le manque d'appui à la coordination se traduit par un niveau de *communication* qui semble trop chronophage. La communication est importante dans certaines phases et se déroule dans plusieurs temporalités. Les opérateurs souhaiteraient qu'elle soit plus synchrone avec le client pour limiter la multiplication des échanges avec le régulateur (RC1). Ils regrettent également le manque de communication avec le régulateur pour connaître l'état d'avancement du dossier. Nous pensons que des outils de coordination adéquats pourraient pallier ce manque.

4.3.5 Limites sur la validité

Une des limites de notre étude est la localisation des participants, qui opèrent tous en France. Cependant, certains des opérateurs ont préparé des dossiers pour d'autres pays, ou travaillent avec des clients internationaux. De plus, la méthodologie SORA est déjà reconnue dans plusieurs parties du monde telles que les Etats-Unis, l'Australie et le Japon [103].

L'échantillon de la population des participants pourrait ne pas être adéquat. Cependant, nous avons interrogé une grande variété d'opérateurs, effectuant des missions diverses telles que l'acquisition de données, la livraison de drones ou le pilotage d'essaims de centaines de drones. Nous pensons avoir couvert de manière adéquate les opérations de drones actuelles en raison de la diversité de nos participants et de leur nombre. En effet, Guest *et al.* [125] indiquent que 12 participants sont nécessaires pour atteindre la saturation. Nous avons dans notre panel 14 opérateurs de drones et 2 régulateurs, dont l'un est le chef de l'équipe de régulateurs qui couvre toutes les opérations nécessitant une autorisation d'exploitation en France.

Il existe d'autres outils disponibles en ligne pour aider à la préparation des vols mais qui n'ont pas été mentionnés lors des entretiens : soit ils sont inconnus

des opérateurs ciblés, soit ils ne répondent pas à leurs besoins. Une hypothèse est que ces outils pourraient être utilisés pour des missions qui ne nécessitent pas d'autorisation d'exploitation.

4.4 Résumé

Nous avons mené quatorze entretiens avec des opérateurs de drones sur leur processus de préparation de missions nécessitant une demande d'autorisation d'exploitation spécifique, ainsi que deux entretiens avec les autorités chargées d'accorder l'autorisation.

Nous espérons que les contributions seront utiles à la fois aux concepteurs de systèmes et aux chercheurs en interaction homme-machine. À partir des résultats des entretiens, nous avons conçu un modèle du processus de demande d'AESCoù les tâches à effectuer et les parties prenantes concernées sont identifiées. Les concepteurs peuvent s'appuyer sur les tâches et les contextes présentés pour concevoir de nouvelles interactions. Le modèle permet également de classer un outil utilisé dans une mission par rapport aux tâches : s'il soutient la réflexion, s'il accélère le traitement de la demande ou s'il soutient les aspects collaboratifs.

Nous avons aussi identifié la notion de paramètres opérationnels qui permet une caractérisation précise d'une mission de drone et ouvre des perspectives de recherche sur la manière de les rendre visibles et manipulables par les utilisateurs afin de décrire leur mission ou d'évaluer la sécurité.

Notre caractérisation des différentes relations entre les parties intéressées et les améliorations possibles identifiées offrent de nouvelles perspectives de recherche pour les collecticiels.

Nous avons formulé 9 recommandations qui ont été consolidées par un questionnaire de suivi afin d'aider à la conception de futurs outils de planification de mission. La priorité signalée par les opérateurs peut également renseigner sur le choix des fonctionnalités qui pourraient avoir un impact plus important.

Cependant, étant donné l'écart important entre les résultats et le faible nombre de répondants, nous pensons qu'il s'agit d'une tendance intéressante mais qu'elle ne constitue pas une forte indication de classement. Le modèle et les recommandations constituent une contribution théorique qui a été validée par des données subjectives mais qui nécessite encore une expérimentation sur le terrain. Les travaux futurs se concentreront sur l'implémentation de ces recommandations au sein de prototypes interactifs et leur validation via des études de terrain avec des opérateurs de drones.

Contributions

Selon la triangulation [187], les contributions présentées ici sont :

1. de nature empirique :
 - des retours d'expériences de professionnels des drones dans différentes industries, ainsi que la description de leurs pratiques et des outils

utilisés lors de la préparation de missions ;

- des principes importants concernant le soutien de la sécurité : la tension entre vitesse et réflexion, l'aspect créatif mais contraint par l'obligation de pouvoir justifier rigoureusement par la suite, l'aspect collaboratif ;

2. de nature théorique :

- une modélisation en trois étapes de la préparation d'une mission de drones nécessitant une demande d'autorisation d'exploitation spécifique ;
- neuf recommandations pour la conception des futurs systèmes plus utilisables de préparation de missions de drone sûres.

3. en matière de design :

- le besoin d'un outil unifiant le cadre d'étude de sécurité avec les interactions nécessaires pour compléter une étude de risques pour une mission de drones

Chapitre 5

Manipulation des paramètres opérationnels

"Knowledge is only potential power. It becomes power only when, and if, it is organized into definite plans of action, and directed to a definite end".

– Napoleon Hill

"You can't just ask customers what they want and then try to give that to them. By the time you get it built, they'll want something new".

– Steve Jobs

Nous proposons de modéliser les PO d'une mission comme des variables sur une carte, de les rendre manipulables avec un retour d'information rapide pour évaluer les risques, et de partager les résultats avec les autres parties prenantes.

Notre objectif est d'appliquer et valider ce *concept d'analyse géovisuelle des paramètres opérationnels* sur un cas d'utilisation précis, par rapport à certaines des recommandations du chapitre précédent : RC4 car priorisée par les exploitants, RC2 car nous soutenons que les PO sont des primitives à partir desquelles une partie importante des actions et interactions sont dérivées, ainsi que RC6 pour combler un vide identifié par la RSL disant que les méthodes d'étude de risque actuelles ne tirent pas parti des représentations cartographiques, alors que la phase de vol les utilise en majorité.

Après avoir illustré le concept, nous détaillons ensuite les résultats d'une étude de conception de huit mois durant lesquels nous avons accompagné un opérateur de drone depuis les premières phases de conception jusqu'à la demande d'autorisation. Au cours de cette étude longitudinale, nous avons évalué et affiné notre prototype de manière itérative afin de répondre à ses besoins. Nous rendons également compte d'une étude par groupes de discussion afin de recueillir des commentaires supplémentaires sur notre travail et de généraliser nos résultats. Nous concluons par une discussion sur les contributions, leur validité et les futures orientations de recherche.

5.1 Concept

Pour soutenir la sécurité des opérations de drones pendant la phase de préparation, nous proposons de modéliser les PO d’une mission comme des variables sur une carte, de les rendre manipulables avec un retour d’information rapide pour évaluer les risques, et de partager les résultats avec les autres parties prenantes. Ce concept repose sur le **rendu des paramètres opérationnels sur une carte** et sur des **feedbacks concernant la sécurité** lors des **interactions avec les paramètres opérationnels**. Il correspond à l’application des recommandations suivantes :

- RC2 : *Utiliser systématiquement les paramètres opérationnels pour décrire une mission.*
- RC4 : *Soutenir l’exploration des paramètres opérationnels et estimer leurs impacts sur la sécurité de la mission.*
- RC6 : *Soutenir la représentation et de la manipulation des paramètres opérationnels sur les cartes.*

Nous finissons par un exemple afin de le présenter graphiquement.

5.1.1 Rendu des paramètres opérationnels sur une carte

L’évaluation de la sécurité d’une opération de drone nécessite une représentation adéquate sur une carte. Le chapitre 4 a montré qu’une mission peut être décrite par ses PO [228]. Ceux-ci peuvent être classés entre les paramètres externes non-contrôlables, les paramètres fixes mais contrôlables et enfin ceux que l’opérateur peut choisir et ajuster.

Certains de ces PO peuvent être des données géospatiales, comme les zones et les tampons, les trajectoires et les positions des membres de l’équipage. Les données géospatiales nécessitent des outils et des méthodes spécifiques pour en tirer pleinement parti [207]. Il est fort probable que la présentation de données dans un contexte spatial facilite l’analyse et la prise de décision ultérieure, par opposition aux tableaux ou aux descriptions textuelles [76]. De plus, comme les zones géographiques considérées sont toutes adjacentes, les décisions devraient être plus rapides et plus précises qu’avec une présentation sous forme de tableau [76]. La première proposition consiste à **modéliser les PO comme des variables à représenter sur une carte interactive**.

5.1.2 Fournir un retour d’information sur la sécurité après ajustement des paramètres opérationnels

Nous proposons que les opérateurs soient en mesure de manipuler les PO de leurs opérations et d’avoir un retour d’information immédiat (*feedback*) sur les risques ou les problèmes de sécurité que ces changements pourraient poser. Ce principe s’appuie sur l’analyse géovisuelle pour soutenir la prise de décision spatiale en combinant la puissance de traitement de l’ordinateur pour rendre les graphiques avec précision selon des paramètres donnés bien définis, et la créativité et l’expertise de l’utilisateur pour analyser la situation et explorer des

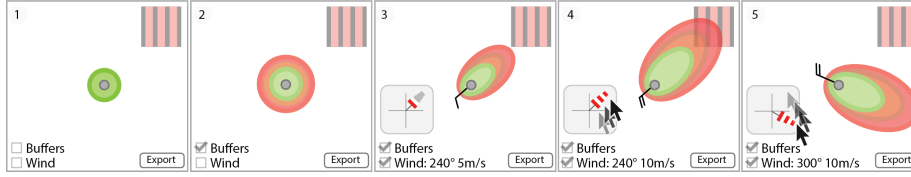


FIGURE 5.1 – Évaluation de l'impact du vent sur les buffers de sécurité : 1) l'opérateur place le télépilote, et la zone nominale est automatiquement tracée en vert ; 2) affichage des zones tampons requises ; 3) affichage de l'impact du vent sur les buffers avec une manche à air apparaissant pour illustrer la direction et la vitesse du vent ; 4-5) la manipulation de la manche à air met à jour les zones en temps réel pour déterminer les conditions de vent acceptables pour lesquelles un vol ne doit pas être effectué, si les tampons de sécurité chevauchent ou non la "zone interdite de vol" en haut à droite.

solutions [14]. Pour une efficacité maximale, "l'utilisateur doit pouvoir interagir avec les modèles informatiques et obtenir un retour immédiat sous une forme appropriée" [14].

Nous soutenons également que l'interaction utilisant la Manipulation Directe [251] des paramètres opérationnels est adéquate pour de telles tâches. La manipulation directe est un style d'interaction dans lequel l'utilisateur manipule directement des objets d'intérêt et obtient un retour immédiat sur ses opérations, comme avec un glisser-déposer dans un système de fichiers et de dossiers.

La manipulation directe présente plusieurs avantages dans notre contexte. Premièrement, elle permet des actions rapides, réversibles et incrémentales sur la carte, avec des résultats immédiatement calculés et visibles. La rétroaction immédiate et la réversibilité favorisent l'exploration, car l'opérateur peut essayer et ajuster différentes solutions plusieurs fois. Deuxièmement, ils utilisent des métaphores des objets naturels avec lesquels les opérateurs de drones travaillent habituellement, et facilitent l'apprentissage et l'utilisation de l'outil. Cela permet la reconnaissance plutôt que la mémorisation, c'est-à-dire que l'opérateur a une charge de travail cognitive moindre car il voit des informations sur ce qu'il fait plutôt que de se souvenir des paramètres ou de l'endroit où ils se trouvent. Cela devrait également lui permettre d'allouer davantage de ressources cognitives à l'évaluation des risques. Enfin, la Manipulation Directe peut offrir une approche *"what you see is what you get"* ou "ce que vous voyez correspond au vol que vous allez effectuer" à la description des Conops. Les éléments étant graphiques, cela peut aider à communiquer les concepts d'opérations non seulement à l'opérateur mais aussi aux autres parties prenantes telles que les clients ou les régulateurs.

5.1.3 Exemple de scénario : les buffers et le vent

La figure 5.1 illustre un scénario dans lequel un opérateur doit surveiller une zone souvent ventée. La zone nominale où le vol peut normalement avoir lieu est en vert. Les tampons de sécurité sont en orange pour la zone de contingence

et en rouge pour la zone d'urgence. Il y a une "zone d'interdiction de vol" en haut à droite.

Pour trouver la plage des valeurs possibles pour le paramètre opérationnel 'Vent' pour l'opération, l'opérateur commence par manipuler la force et la direction du vent en faisant glisser la souris sur la manche à air. Cette interaction met à jour la forme des buffers de sécurité et d'urgence afin d'évaluer l'impact du vent et le chevauchement possible avec des zones interdites.

Les objectifs spécifiques de ce chapitre sont de mettre en oeuvre ce concept :

1. Représenter les PO, trouver les interactions qui facilitent leur manipulation, savoir calculer le résultat et communiquer le feedback de chaque ajustement.
2. Le valider avec des utilisateurs.

Pour caractériser, vérifier et valider ce concept, nous appliquons une démarche participative. Celle-ci nous permet de commencer par un cas d'usage à notre portée, à partir duquel nous généraliserons.

5.2 Méthode

Nous avons d'abord mené une étude longitudinale avec un opérateur de drone unique afin d'explorer et de caractériser notre concept dans un contexte réel.

Nous avons ensuite mené une étude de groupe avec les parties prenantes de la première étude et les régulateurs afin de valider et de généraliser notre concept à d'autres opérations possibles et d'identifier les futures directions de recherche.

La figure 5.2 détaille les étapes de ces études.

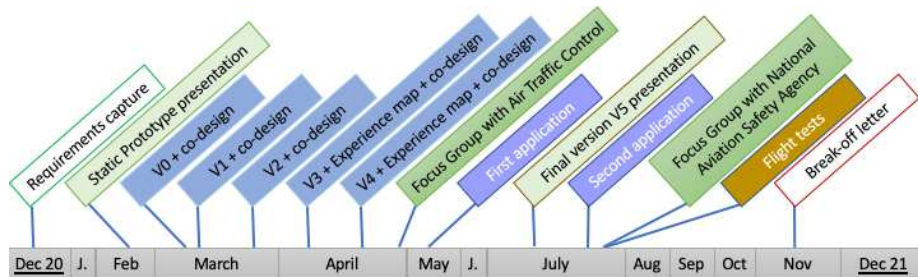


FIGURE 5.2 – Chronologie des réunions et événements lors de la conception et l'évaluation du prototype.

5.2.1 Étude longitudinale

Pour explorer et évaluer notre concept, nous avons mené une étude longitudinale avec un opérateur de drone. Les entretiens ont indiqué que chaque

processus de demande d'autorisation est unique. Nous n'avons pas cherché à créer une solution générique mais plutôt à explorer l'espace de conception et à acquérir des points de vue et des idées fondées sur des activités réelles. Nous avons préféré une approche avec un cas simple puis essayé de l'étendre par la suite.

Notre participant unique travaillait sur un Conops pour assister la maintenance du système d'atterrissage aux instruments ou *Instrument Landing System (ILS)* d'un aéroport à l'aide d'un drone au lieu de l'emploi habituel d'un camion et d'opérateurs humains. Les opérations consistaient à faire voler le drone dans le périmètre de l'aéroport selon des profils de vols établis dans le document de maintenance et à communiquer à la fois avec les contrôleurs aériens et l'équipe de maintenance. Compte tenu de la réglementation et des risques posés par le vol d'un drone dans un aéroport, l'opérateur devait obtenir l'autorisation opérationnelle des autorités et devait se coordonner avec le contrôle aérien. Nous avons proposé de développer avec l'opérateur de drone, et de façon itérative, un prototype pour fournir un soutien à la planification de l'opération et à l'exploration des questions de sécurité nommé **SafeCoop**.

Participant Notre participant unique (P1) est à la fois un pilote de drone à distance certifié et un ingénieur des systèmes de drone avec une formation en systèmes de contrôle et en dynamique de vol. Il s'agit d'un expert qui connaît aussi bien la réglementation que le matériel et son utilisation.

Dispositif expérimental Nous avons commencé par un prototype de base consistant en une application Web en ligne qui présente une carte sur laquelle les paramètres opérationnels sont dessinés et manipulés, comme l'illustre la figure 5.3. La première version permettait à l'opérateur de placer le pilote de sécurité et de voir les buffers concentriques autour de cette position. La première interaction permettait de visualiser l'impact de la force du vent sur ces buffers de sécurité. Nous avons utilisé la bibliothèque Leaflet¹ pour construire la carte, et des sources de données externes provenant de dépôts publics pour fournir des couches de données supplémentaires telles que les limites de l'aéroport et un fond de carte des rues.

Processus de conception itérative Nous avons commencé par une réunion initiale pour comprendre les objectifs de P1 et saisir les exigences initiales pour adapter notre prototype aux opérations prévues. Nous avons ensuite conçu et évalué notre prototype de manière itérative en utilisant des techniques de conception participative [246] telles que la co-conception de représentations sur des maquettes de basse fidélité ou la réalisation de cartes d'expérience, une synthèse de l'expérience d'un utilisateur utilisée pour identifier les problèmes et imaginer des solutions possibles [3]. La figure 5.2 détaille les étapes et la chronologie de ce processus. Dès la première version fonctionnelle, le prototype a été

1. <https://leafletjs.com/>

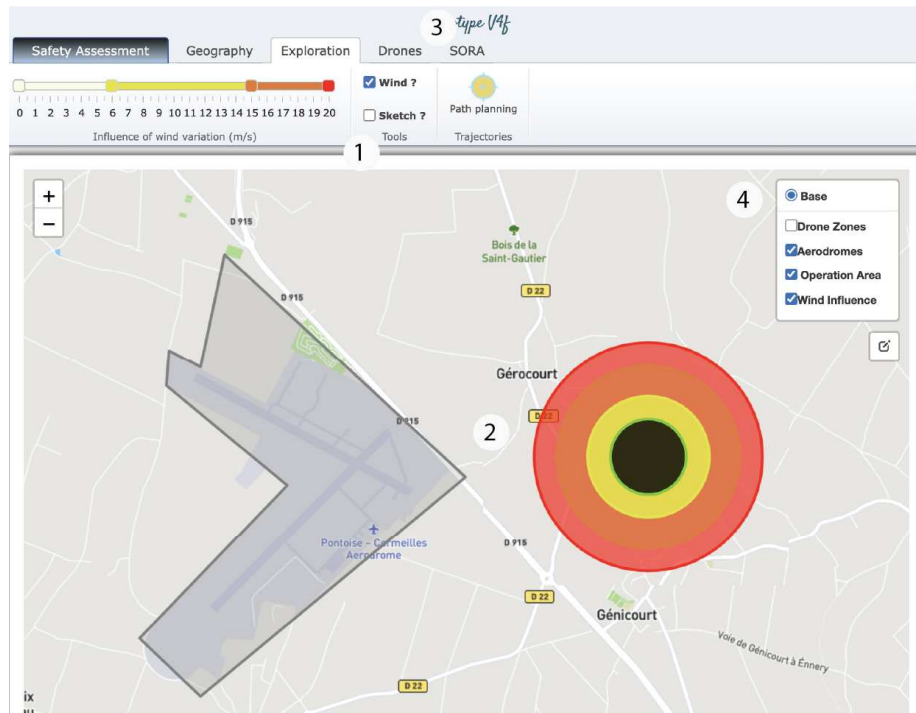


FIGURE 5.3 – La carte de départ : variateur de vent (1), qui influence les buffers affichés sur la carte (2), d'autres contrôles pour l'analyse de la sécurité comme la définition de la trajectoire, l'onglet Géographie et Drones (3), et le contrôle des couches avec un petit ensemble de données aéronautiques (4).

fourni à l'opérateur en tant que sonde technologique [136] afin qu'il puisse l'utiliser seul sur une plus longue période. Nos objectifs étaient de mieux comprendre ses besoins, d'évaluer la technologie et de recueillir de nouvelles orientations pour les recherches futures.

Collecte et analyse des données Nous avons enregistré nos réunions sur vidéo et demandé à P1 de fournir des commentaires et des captures d'écran des applications lorsqu'il estimait que la représentation ou l'interaction pouvait être améliorée. Avant la fin du projet, nous avons utilisé une lettre de rupture inspirée de la sonde culturelle [115]. Cette technique consiste à demander au participant d'écrire une lettre de rupture avec le logiciel pour enregistrer ses sentiments et l'inspiration pour la suite. Nous nous attendions à découvrir les forces de notre prototype, ses limites, les opportunités restant à explorer, et l'expérience de P1 sur notre travail, selon ses propres mots. Nous avons ensuite analysé les résultats à l'aide d'un codage qualitatif des données afin de classer nos découvertes en thèmes [261].

5.2.2 Etude par groupes de discussion

Après l'étude longitudinale en conditions réelles, nous avons voulu consolider nos résultats et notre concept avec d'autres parties prenantes ; notamment pour obtenir le point de vue des régulateurs qui accordent les autorisations opérationnelles. Nous avons donc organisé deux groupes de discussion pour approfondir et valider notre concept. Les deux sessions de groupes de discussion ont été réalisées à distance, enregistrées en vidéo et transcrites pour analyse.

Participants Le premier groupe de discussion comprenait des intervenants impliqués dans les opérations menées dans le cadre de notre étude de conception. En plus de P1, trois contrôleurs aériens et le chef d'équipe du contrôle aérien de l'aéroport où la mission était prévue ont participé. Le deuxième groupe de discussion comprenait six membres de l'équipe de la réglementation française sur les drones qui sont chargés de vérifier et de valider les demandes d'autorisation d'exploitation.

Déroulement Le groupe de discussion a commencé par une brève introduction à nos objectifs et une démonstration du prototype pour le scénario de P1. Nous avons également présenté d'autres prototypes illustrant deux scénarios différents afin de favoriser la discussion au-delà d'un cas spécifique. Le premier scénario portait sur le relevé automatisé d'une zone, et le second sur le suivi d'un convoi à longue distance dans des zones peuplées. Nous leur avons ensuite demandé de réagir à notre concept et de réfléchir aux forces et aux limites de cette approche. Nous leur avons posé des questions sur la manière dont un tel concept pourrait faciliter la collaboration avant et pendant les opérations afin d'accélérer le processus de demande d'autorisation et de renforcer la sécurité. Pour le second groupe de discussion, nous avons également posé des questions sur leur processus et les outils qu'ils utilisent pour effectuer la validation des demandes d'autorisation opérationnelle.

5.3 Résultats de l'étude longitudinale

L'étude longitudinale nous a permis d'explorer et d'évaluer notre concept depuis le stade initial de la conception de l'opération jusqu'à la production des documents pour l'obtention de l'autorisation, et les essais en vol avec le matériel envisagé. Nous avons exploré plusieurs interactions et représentations de paramètres opérationnels pour faciliter le travail de P1. Grâce à notre prototype, P1 a pu **concevoir et décrire les Conops (RC1)**, **effectuer une évaluation des risques (RC2, RC4, RC6)** et **exporter des données à utiliser dans la demande d'autorisation (RC7)**. La figure 5.4 présente la version finale du prototype incluant les données de l'opération de P1. Dans cette section, nous présentons nos résultats en fonction des tâches spécifiques que nous avons identifiées au cours de notre analyse.

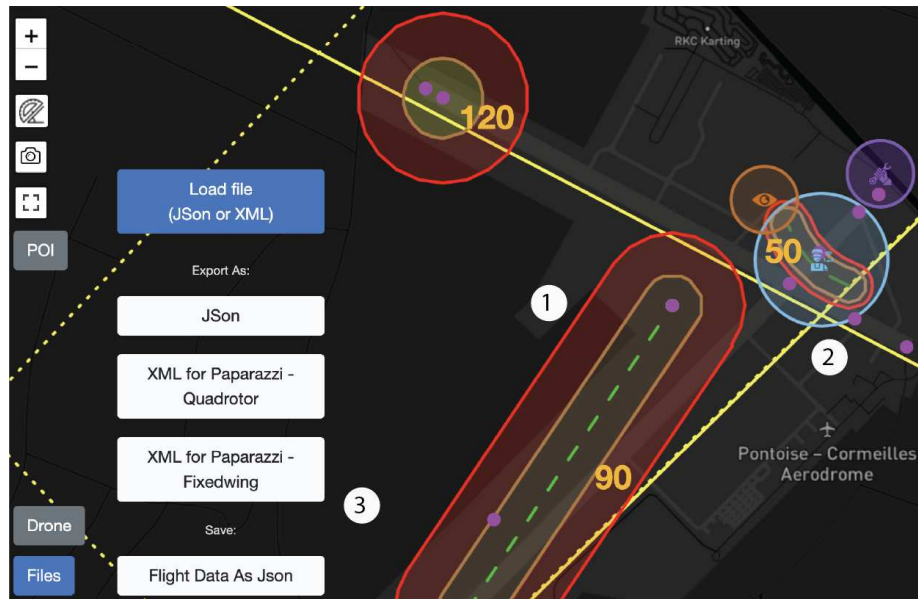


FIGURE 5.4 – Le prototype final : les trajectoires avec leurs tampons de sécurité (1), les acteurs en place (2), et le panneau d’import/export de fichiers ouvert (3).

5.3.1 Représentation et saisie des paramètres opérationnels

Nous avons commencé par identifier les paramètres opérationnels qui seraient nécessaires pour définir l’opération. P1 a expliqué qu’il devait décrire des trajectoires données par l’équipe de maintenance de l’aéroport afin d’enregistrer des données pour calibrer le système ILS. Il a également expliqué que les contrôleurs aériens souhaitaient que l’opération reste à l’intérieur des limites de l’aéroport et qu’ils soient en communication directe avec le responsable de l’opération de drone. Dans ce cas, il s’agit d’un rôle différent de celui de pilote à distance.

La suite de cette sous-section énumère les paramètres opérationnels que nous avons identifiés et représentés dans notre prototype, ainsi que les interactions les concernant.

Le prototype final affiche les **limites de l’aéroport** en récupérant des données sur des services en ligne. Suite à la suggestion de P1, nous avons également inclus des données représentant les **trajectoires de décollage et d’atterrissage des avions**, telles que spécifiées dans les cartes visuelles de l’aviation internationale, afin de fournir un contexte supplémentaire sur les opérations aériennes. Nous avons ensuite conçu une interaction pour définir des **points nommés** dans notre prototype, soit en pointant et en cliquant sur la carte, soit

en spécifiant des coordonnées géographiques précises. Après avoir sélectionné un point, P1 pouvait **définir une trajectoire à partir de ce point**.

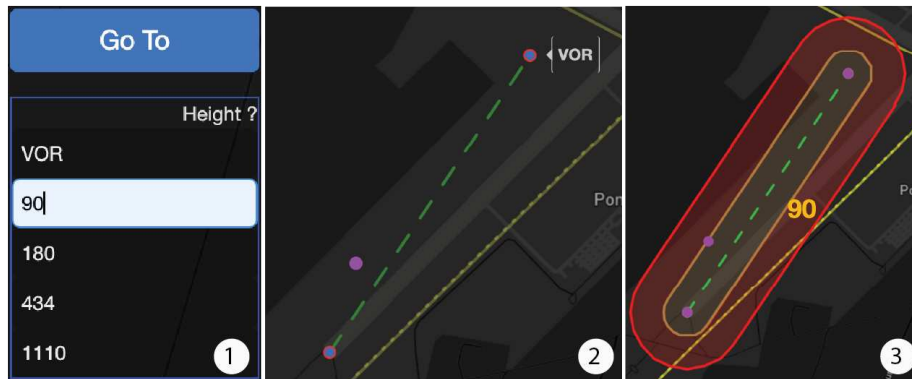


FIGURE 5.5 – Le panneau "GOTO" ou voler en ligne droite entre deux points - les tampons sont automatiquement calculés lorsque l'altitude est modifiée (1), la trajectoire nominale (2), et les tampons de contingence et d'urgence résultants une fois affichés (3).

Nous avons créé **quatre types de trajectoires** possibles : le vol stationnaire pour rester immobile au-dessus d'un point, le mouvement vertical au-dessus d'un point, le déplacement du point A au point B, et l'orbite autour d'un point avec un angle et une distance spécifiques. Pour chaque trajectoire, P1 a demandé de modifier la **hauteur de l'aéronef au-dessus du sol** en utilisant un champ de formulaire pour définir les valeurs au format numérique, malgré le fait que nous ayons proposé un curseur pour augmenter ou décroître cette hauteur. Il a expliqué cela par un souci de la précision. Par exemple, pour spécifier une translation le long de la piste, P1 devait sélectionner le point de départ, puis sélectionner l'opération "GOTO" de la trajectoire sur un bouton de l'interface, avant de cliquer sur le point cible. Une fois l'interaction terminée, un formulaire apparaît pour définir l'altitude et les paramètres de sécurité supplémentaires, comme l'illustre la figure 5.5.

Pour la trajectoire "ORBIT", P1 voulait la spécifier en utilisant un point pour le centre du cercle et un angle à partir de la piste d'atterrissage, qui devenait un axe de symétrie. La figure 5.6 illustre comment il a spécifié une telle trajectoire en utilisant l'axe de la piste et le point d'alignement du système d'atterrissage aux instruments comme l'exigeait la spécification donnée par l'équipe de maintenance.

P1 a expliqué qu'il voulait représenter **la position des parties prenantes sur la carte** afin de vérifier leur capacité à obtenir un retour visuel du drone pendant l'opération. Il s'agissait de la tour de contrôle du trafic aérien, du responsable des opérations, de l'équipe de maintenance au sol, du télépilote et d'éventuels observateurs externes. Nous avons ajouté des **icônes mobiles** en utilisant des **couleurs correspondant à leur description dans les Conops**

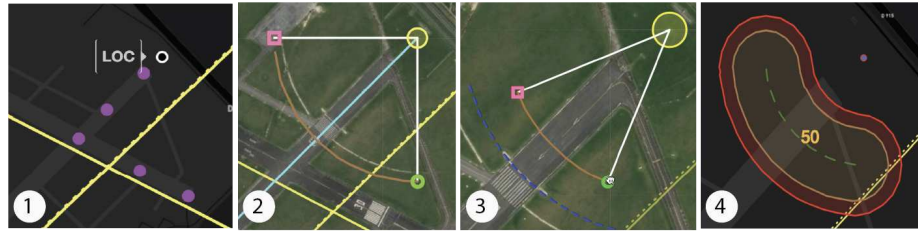


FIGURE 5.6 – Spécification d’une trajectoire *ORBIT* ou rotation autour d’un point choisi au préalable : 1) P1 choisit le point d’intérêt autour duquel orbiter, ici nommé LOC. 2) P1 ajuste le demi-angle par rapport à l’axe de la piste. 3) La trajectoire résultante est visible sur la carte et peut être ajustée à l’aide des poignées graphiques. 4) Le prototype affiche les tampons de sécurité.

pour les rendre **visibles sur la carte avec un rayon modifiable pour décrire leur champ de vision** comme présenté dans la figure 5.7.

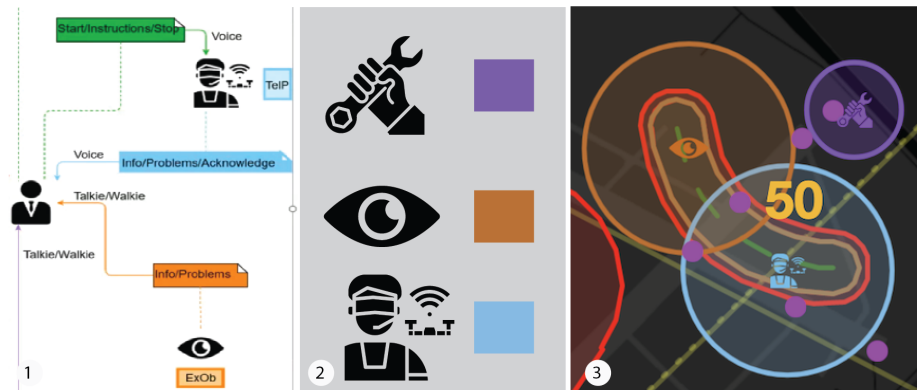


FIGURE 5.7 – Les couleurs et les icônes des entités, qui sont détaillées en (2), sont cohérentes dans le document d’application (1) et sur la carte (3). Le télépilote et un observateur externe travaillent ensemble pour garder le drone en vue même s’il s’éloigne de la portée de l’autre.

Dans la lettre de rupture, P1 a déclaré que la représentation des paramètres opérationnels a été particulièrement utile pour comprendre la situation complète et produire des documents descriptifs pour les autres parties prenantes.

5.3.2 Exploration visuelle de la sécurité

P1 a expliqué qu’il devait définir des zones tampons ou *buffers* de contingence et d’urgence autour de la trajectoire, et s’assurer que ces zones tampons restent dans les limites de l’aéroport, car il y a des routes autour de l’aéroport. À partir des profils de vol, nous avons affiché les **buffers en orange pour la**

contingence et en rouge pour l'urgence, comme le montre la figure 5.5. Les **zones tampons de sécurité peuvent être spécifiées manuellement** à l'aide d'un formulaire **ou calculées automatiquement** selon une formule prédéfinie qui utilise la hauteur du drone au-dessus du sol.

Selon la réglementation, la hauteur du vol détermine un tampon minimum autour de la trajectoire. En visualisant les zones tampons et l'intersection avec les limites de l'aéroport, P1 a pu ajuster la hauteur des trajectoires pour minimiser les risques. Il a expliqué qu'il ajustait la hauteur d'une trajectoire jusqu'à ce qu'elle reste à l'intérieur du périmètre de l'aéroport, tel qu'affiché sur la carte. Il a également utilisé la représentation des tampons pour décider que certaines trajectoires impliquant une altitude élevée ne seraient pas possibles compte tenu des contraintes réelles.

Pour les zones tampons, il a expliqué qu'avoir une visualisation 3D des mouvements serait très utile pour mieux comprendre le mouvement orbital et pour documenter ses Conops pour la demande d'autorisation. Nous avons donc ajouté une **visualisation 3D en plus de la carte 2D**, comme l'illustre la figure 5.8. P1 a expliqué que l'ajustement du point de vue l'a aidé à mieux comprendre l'opération et lui a fourni des illustrations claires pour créer les éléments requis pour l'évaluation et pour l'atténuation des risques pour la sécurité.

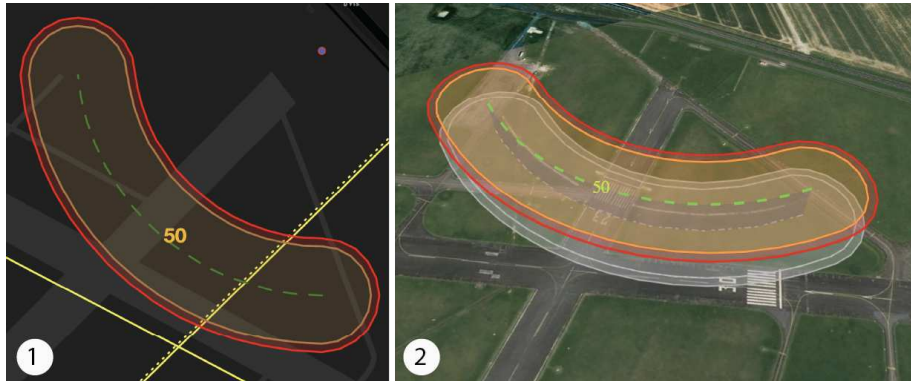


FIGURE 5.8 – Synchronisation des vues 2D (1) et 3D (2).

P1 a déclaré que la manipulation des éléments visuels représentant les positions des acteurs sur la carte (Figure 5.7) était précieuse pour décrire ses Conops et évaluer si un obstacle pouvait être présent entre le pilote et le drone. Pour les segments de vol de longue distance, au-delà de 200 mètres du télépilote, il a placé un observateur supplémentaire pour couvrir la totalité de la trajectoire, assurant ainsi une ligne de vue permanente avec le drone.

5.3.3 Exportation et intégration avec d'autres outils et plateformes

Pour produire le document de demande d'autorisation, P1 voulait décrire les trajectoires prévues, les positions des intervenants et l'utilisation des tampons comme techniques d'atténuation de la sécurité. Nous avons ajouté des fonctionnalités pour exporter des captures d'écran de l'application mais aussi toutes les données de l'application, y compris les trajectoires et les tampons de sécurité, sous forme de fichiers JSON² pouvant être importés dans d'autres logiciels.

Comme il voulait utiliser la station de contrôle au sol et le pilote automatique Paparazzi [114] pour l'opération, nous avons également ajouté la prise en charge de l'exportation des données sous forme de plan de vol Paparazzi valide.

N°	Instructions from	R/C		Autopilot			FTS	
		NOMINAL	FAILSAFE	NOMINAL	FAILSAFE		FAILSAFE	
	Case/mode	ASSISTED 1.2.2.4.1	ASSISTED 1.2.2.4.1	NAV 1.2.2.4.1	NAV 1.2.2.4.1	FAILSAFE 1.2.2.4.2	zero-thrust command signal 1.2.1.5	power supply off 1.2.1.5
1	Nominal Flight Trajectory [1] §3.3.3			Nominal Flight trajectory is implemented in the flight plan as GPS waypoints				
R/C not lost, GPS not lost, Battery not low, Datalink not lost								
2	Contingency [1] §3.3.4		(2) Land Drone in contingency volume	If this fails	(1) As soon as drone gets more than 10m away in all 3 Directions from Nominal Flight trajectory: Zero roll/pitch and current heading setpoint and descent at FAILSAFE_DESCENT_SPEED = 1.5 m/s			
Battery low								
3	Contingency [1] §3.3.4					✓		
R/C lost OR GPS lost OR Datalink lost OR Autopilot not running								
4	Contingency [1] §3.3.4						✓	✓
Whatever the configuration								
5	Emergency [1] §3.3.5						✓	✓

FIGURE 5.9 – Les modes de pilotage en même temps que la politique de pilotage automatique sont configurés en fonction des zones d'évolution de

l'aéronef télépiloté. Les couleurs sont cohérentes sur la carte et dans le document d'application. Le vert est la trajectoire de vol nominale, le jaune est le tampon de contingence et le rouge est le tampon d'urgence où le système de fin de vol ou *Flight Termination System (FTS)* serait instantanément activé.

Dans le Conops, plusieurs modes de pilotage automatique ont été définis pour répondre à des situations spécifiques telles que l'entrée dans la zone d'urgence, la batterie faible ou la perte de la radio, comme le montre la figure 5.9. Nous avons ajouté les comportements du pilote automatique selon des règles spécifiques lors de l'exportation du plan de vol. Plus précisément, nous avons

2. Javascript Object Notation

lié le mode de sécurité pour entrer dans un tampon de contingence ou le mode d'extinction automatisée si les drones entrent dans le tampon d'urgence. Nous avons également construit un serveur qui écoute les messages de la station de contrôle au sol Paparazzi pour récupérer et afficher le drone dans notre prototype pendant l'opération réelle, comme illustré sur la figure 5.10.

Grâce à Paparazzi, P1 a pu effectuer des tests réels sur un aérodrome disposant d'une zone dédiée aux vols d'aéromodélisme. Le drone s'est bien conformé au plan nominal ainsi qu'au plan en cas d'urgence, *i.e.* dans les situations telles que la perte de GPS, perte de liaison de données, perte de contrôle et violation du géo repérage, avec les limites des buffers spécifiées à partir du prototype.

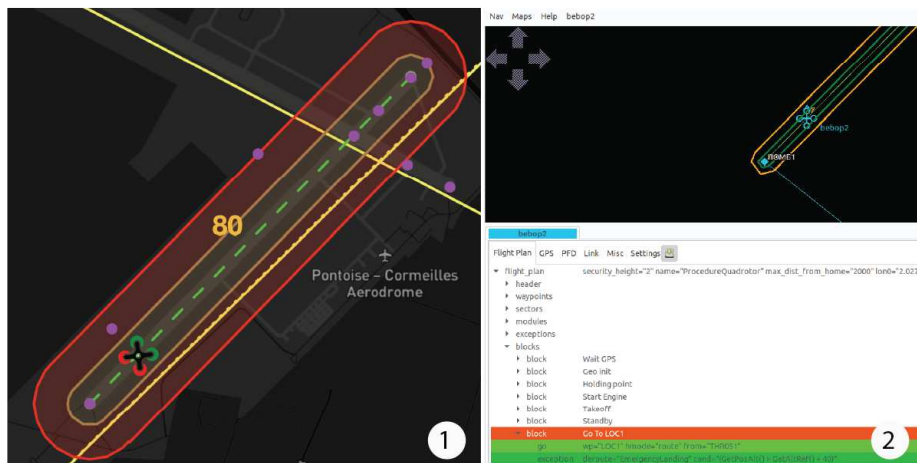


FIGURE 5.10 – La mission peut être exportée vers la station de contrôle au sol Paparazzi (2) avec les tampons de sécurité. Pendant l'opération, la position du drone peut être suivie sur la carte (1).

P1 a expliqué que l'intégration réussie du prototype avec l'écosystème Paparazzi (auto-pilote et station de contrôle au sol) a accéléré le processus depuis la conception de l'opération, l'analyse de la sécurité et la production des documents pour la demande d'autorisation, la prise en compte des contraintes de sécurité dans l'auto-pilote jusqu'aux tests en conditions réelles sur un aérodrome dédié à l'aéromodélisme afin de vérifier les mécanismes de sécurité. Avant cela, il lui a aussi été possible de préparer sa mission puis l'exporter pour le simulateur intégré à Paparazzi, autant de fois que nécessaire.

Nous avons ensuite cherché à étendre le prototype à deux autres cas d'usage (figure 5.11). Le premier consiste à suivre un convoi et à rester dans une certaine zone où le vol est autorisé. Il nous a permis d'ajouter de nouvelles couches de données, comme la densité de la population, les routes, les lignes à haute tension ou les constructions élevées ainsi que de nouvelles interactions comme l'annotation sur la carte ou la possibilité de dessiner une zone d'évolution du

drone respectant une certaine distance par rapport au convoi *SAFEZONE*.

Le second consiste à ajouter une interaction pour spécifier un autre type de trajectoire, le *SURVEY* ou relevé par drone. Elle est utile pour les cas où le drone est employé pour des missions de surveillance de sites ou d'inspection automatisées afin de quadriller une certaine zone.

5.4 Résultats des groupes de discussion

Après avoir présenté notre prototype, le scénario de base et les scénarios supplémentaires, tous les participants ont exprimé leur enthousiasme et ont fourni un retour très positif sur notre concept. Les deux groupes ont exprimé leur intérêt pour essayer l'outil directement pour leur travail afin d'explorer davantage ses possibilités. Nous décrivons ci-dessous les résultats de l'atelier en soulignant les opportunités de notre concept pour une variété d'opérations et l'impact possible sur le soutien à la collaboration entre les parties prenantes.



FIGURE 5.11 – 1) Extrait du cas d'utilisation de suivi, dans lequel le drone doit survoler une zone peuplée. La carte affiche la densité de population et la trajectoire prévue. 2) Extrait du cas d'utilisation de l'enquête, dans lequel un relevé automatisé d'une zone limitée doit être effectué avec une génération automatique du buffer.

5.4.1 Représentation des paramètres opérationnels sur une carte

Les contrôleurs aériens ont expliqué que les profils de vol affichés sur la carte de l'aéroport étaient faciles à comprendre. L'un d'entre eux a déclaré que "*cela rend l'opération très claire*", comme il connaissait parfaitement l'aéroport et pouvait voir les trajectoires au-dessus de celui-ci. Les régulateurs ont mentionné que le fait de fournir une vue en 3D permettait également de clarifier des trajectoires spécifiques et leur éventuel impact sur la sécurité. De manière surprenante, pour le groupe de régulateurs, les trajectoires n'étaient pas primordiales. Ils étaient plutôt intéressés par la manière dont la sécurité était gérée par rapport à ces

trajectoires et à leur environnement. Ils ont indiqué que la représentation des zones tampons était très utile et faisait le lien avec la documentation requise par la méthodologie SORA.

Les régulateurs ont confirmé qu'ils utilisaient diverses applications cartographiques pour évaluer les risques de toutes les intentions de vol soumises. Ils ont remarqué que certaines couches de données importantes étaient déjà présentes par défaut dans le prototype, comme la densité de population et les zones tampons calculées (Figure 5.11). Pour citer un membre de l'équipe de régulateurs : *"En effet, sur votre logiciel, avoir la combinaison d'un satellite et d'une carte de base vues, routes, densité de population ... J'avoue que c'est quelque chose dont je suis assez fan ! Je reconnais que cela pourrait nous simplifier la vie."* Ils ont également indiqué que certaines données aéronautiques importantes pour leur travail étaient manquantes, comme la carte visuelle 1 :50 000 de l'OACI.

5.4.2 Soutenir l'évaluation de la sécurité

Pour le premier groupe de discussion, les contrôleurs aériens ont trouvé que l'outil était clair et précis pour estimer le niveau de sécurité. Ils ont exprimé que les zones tampons et le lien avec la politique de pilotage automatique étaient des ajouts très précieux comparés aux plans de vol qu'ils avaient l'habitude de recevoir lors des précédentes opérations de drones menées sur leur site. Un contrôleur aérien a déclaré que : *"Nous ne sommes jamais allés aussi loin pour le niveau des détails (...). Je me demande si cela ne pourrait pas devenir un modèle pour de futures évaluations des risques."*

Les contrôleurs aériens ont demandé s'ils pouvaient utiliser l'outil lors de futures opérations expérimentales qu'ils allaient accueillir, pour surveiller la position du drone pendant son vol et sa distance par rapport aux tampons de sécurité. Ils ont indiqué qu'ils ne disposaient d'aucun outil pour évaluer la sécurité pendant la phase de préparation, ni de la connaissance de la situation des opérations en cours sur leur terrain pendant l'exécution, à l'exception du retour visuel direct et des appels téléphoniques avec les pilotes à distance.

Au cours du deuxième groupe de discussion, nous nous sommes concentrés sur la manière dont les régulateurs évaluaient et validaient la sécurité des opérations qu'ils devaient examiner. Ils ont expliqué qu'ils utilisaient principalement des cartes et que notre concept semblait très pertinent pour leur travail. Ils ont expliqué qu'ils passaient fréquemment d'un logiciel à un autre pour obtenir ou traiter des données géographiques afin d'accomplir leurs tâches. Ils ont trouvé très efficace d'unifier toutes les applications avec de nombreuses sources de données et des interaction dédiées. L'un des membres de l'équipe a déclaré que *"le logiciel est comme une combinaison de nos outils, il nous faciliterait la vie"*. En ce qui concerne les tampons de sécurité, ils ont apprécié que la formule de calcul de la zone tampon soit modifiable, car ils utilisent souvent différentes formules pour étudier les risques possibles.

Les régulateurs ont suggéré plusieurs améliorations possibles pour soutenir la production de contenu lié à la sécurité dans l'application. Par exemple, l'un d'entre eux a suggéré d'ajouter un module permettant de calculer les niveaux

de risque SORA en fonction des paramètres opérationnels. Il a expliqué que : *"Par exemple, si je place où je veux voler, à quelle vitesse, ma trajectoire et les conditions de vent. L'application me dira quel est le risque au sol"*. Un autre régulateur souhaitait ajouter une interaction permettant d'examiner les formules utilisées par les opérateurs pour calculer les dimensions des tampons.

Lors de l'examen des approches automatisées d'atténuation des risques, telles que la création systématique de zones tampons ou des suggestions de mitigation comme, par exemple, voler pendant les week-ends pour éviter les zones peuplées, les régulateurs ont douté de leur pertinence. Ils ont expliqué que les opérateurs de drones sont véritablement créatifs lorsqu'ils doivent déterminer l'atténuation des risques et qu'ils proposent fréquemment des solutions nouvelles ou inattendues. L'un d'eux a fait remarquer que *"comme il existe une grande diversité de situations possibles, une grande diversité de solutions d'atténuation pourrait également être proposée"*. Le responsable de l'équipe de régulateurs a expliqué que *"la difficulté de l'atténuation vient du fait que le processus est qualitatif (...), en particulier pour les mesures d'atténuation visant à réduire le nombre de personnes en danger sur le terrain. Donc en théorie, l'opérateur pourrait tout proposer comme solution"*. Ils ont tous insisté sur le fait que les opérateurs étaient responsables du choix des moyens pour atténuer leurs risques. Cela impliquait que l'outil devait plutôt exposer la situation mais ne pas suggérer de moyens d'atténuation. Selon les régulateurs, le fait de permettre de déterminer la faisabilité d'une opération, c'est-à-dire son niveau de sécurité par rapport à ses PO, est une contribution importante.

5.4.3 Prise de décision et Échange d'informations

Les contrôleurs aériens ont trouvé la visualisation très pratique pour baser leurs discussions sur les procédures potentielles qu'ils auraient à mettre en œuvre pendant l'opération. Par exemple, ils ont commencé à discuter des règles à appliquer au roulage de certains hélicoptères et avions de l'aviation générale pendant l'opération de P1. Ils ont également discuté et négocié des procédures possibles qu'ils appliqueraient pour assurer la fluidité et la sécurité de toutes les opérations qui se dérouleraient en simultané. Lorsque nous leur avons demandé s'ils seraient intéressés pour envoyer des messages ou communiquer à partir du prototype pendant l'opération, ils ont indiqué qu'ils préféreraient se fier au téléphone.

Les régulateurs ont expliqué que l'adoption d'une représentation cohérente pour les dossiers faciliterait leur travail et les échanges avec les opérateurs qui soumettent des demandes d'autorisation. Interrogés sur la possibilité d'échanger des commentaires ou de demander des précisions sur une demande directement sur la carte avec des commentaires par exemple, ils ont expliqué que cela pourrait être utile mais n'était pas une priorité pour eux. Ils communiquent et partagent déjà des fichiers avec les opérateurs, via le courrier électronique, les services de partage de fichiers en ligne et un site web dédié. Ils ont indiqué qu'un système de gestion des versions, avec des visualisations adéquates sur la carte, permettant de vérifier et de suivre les changements entre les différentes réunions ou demandes

avec un opérateur, serait plus important. Comme a insisté le chef de l'équipe du régulateur : *"En tant qu'autorité, je préfère quand un document soumis n'est pas modifiable. La raison en est que notre autorisation opérationnelle repose sur certains moyens d'atténuation qui sont consignés dans un document dont la version est officielle et figée"*.

5.5 SafeCoop Toolkit

Cette section présente la bibliothèque SafeCoop Toolkit, qui sert de brique de base pour le prototype SafeCoop.

J'ai réalisé la plupart des développements sur SafeCoop. A la fin du développement, j'ai supervisé un stagiaire qui a ajouté des éléments pour l'intégration avec l'écosystème Paparazzi. Enfin, j'ai réalisé le refactoring du code afin de séparer la boîte à outils (*toolkit*).

SafeCoop Toolkit est une bibliothèque qui complémente la bibliothèque cartographique *open-source* Leaflet ³. La bibliothèque permet d'ajouter des données pertinentes aux opérations de drones ; créer des éléments interactifs sur les cartes pour représenter et manipuler les paramètres opérationnels d'une opération de drone ; faciliter le lien avec le système Paparazzi. SafeCoop Toolkit contient plusieurs modules que nous décrivons ci-dessous. Un schéma d'architecture des différents module est proposé à la Figure 5.12. Chacun des modules contient du code pour l'affichage, la réaction aux événements, la définition du comportement et le calcul.

5.5.1 Module d'importation de données cartographiques

Ce module permet de récupérer les données impactant les opérations et de les représenter sur la carte ainsi que leur mise à jour. Dans notre cas, il sert à obtenir les données des zones de restriction de drones et des limites de l'aérodrome depuis l'Institut national de l'information géographique et forestière (IGN), ou les données de densité de population via une interface de programmation d'application (*API*) privée, mais aussi l'import de fichiers KML pour les circuits d'aérodromes et les points d'intérêts de la mission. Ce module met à jour les couches de données externes affichées par la carte 2D en tant qu'*overlays*.

5.5.2 Module trajectoires et plans de vol

Ce module permet de spécifier la hauteur et la nature des trajectoires telles que HOVER, VERTICAL, GOTO, ORBIT et SURVEY. Un plan de vol est constitué par la séquence de ses trajectoires. La classe de base est HOVER - ou vol stationnaire à une certaine hauteur et toutes les autres en héritent. Pour l'extension consistant en un suivi de convoi, la trajectoire SAFEZONE permet de dessiner une surface dans laquelle le drone sera contraint de rester. Il s'agit

3. <https://leafletjs.com/>

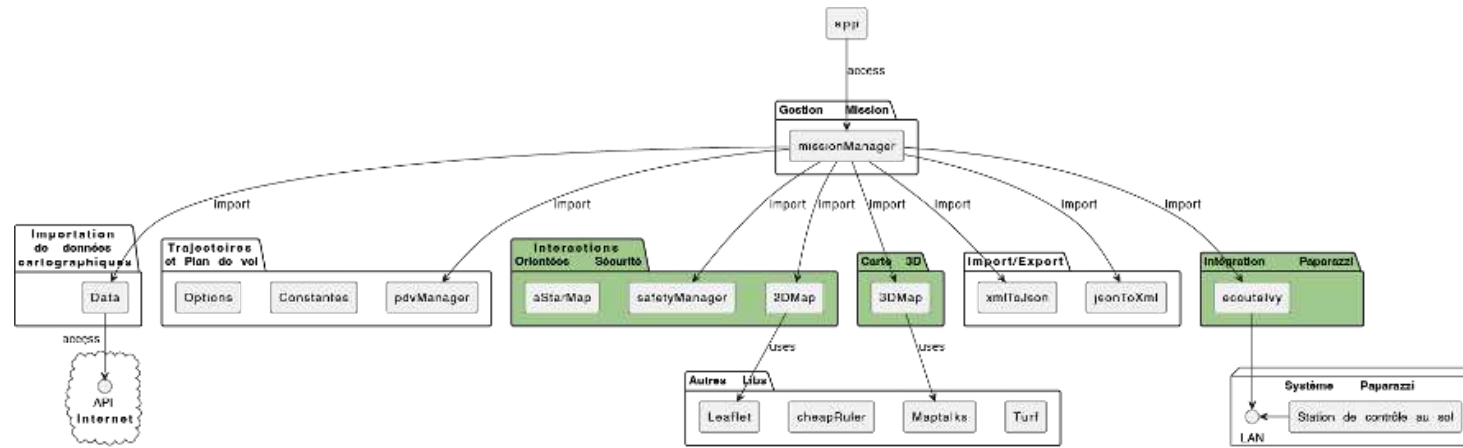


FIGURE 5.12 – Architecture de SafeCoop Toolkit. En vert les modules soutenant les interactions orientées sécurité et l'intégration avec le système Paparazzi.

d'une séquence de GOTO mis bout à bout et qui considère la zone centrale comme étant interdite.

5.5.3 Modules des interactions orientées sécurité

Plusieurs modules, agnostiques de tout système de drone, se concentrent sur les aspects liés à la sécurité :

1. un module permettant de calculer puis dessiner les buffers ou tampons de sécurité en tant que fonction à appeler après la modification des trajectoires, à partir de leur forme, de leur hauteur et d'une formule de calcul balistique.
2. un module permettant de montrer et d'agir sur un marqueur ou encore d'en combiner plusieurs sur la carte et d'associer des conditions pour afficher ou cacher les marqueurs. Par exemple à partir d'un certain niveau de zoom, les marqueurs deviennent déplaçables ou non. Un autre exemple est l'ajoute des pop-ups et le changement des attributs graphiques comme la couleur, l'icône, la taille ou la position ou l'index selon la profondeur (*z-index*). Les points d'intérêts de l'opération et les acteurs sont des instances de ces marqueurs. Le marqueur affichant le drone est aussi pris en charge par ce module.
3. un module permettant de calculer des trajectoires via un algorithme A^* à partir d'une grille et contourner ainsi les zones interdites au drone (*geofencing*).

5.5.4 Module de cartographie 3D

Ce module permet d'afficher une carte tridimensionnelle grâce à la bibliothèque Maptalks⁴. Le contenu de la carte en 2D est adapté pour celle en 3D, sur la base des paramètres opérationnels décrivant la mission.

5.5.5 Module import-export

Ce module permet la production de fichiers bitmap depuis une capture d'écran propre de la carte, c'est-à-dire sans y afficher les contrôles de la carte. De plus, il permet la production de fichiers textes en JSON et en XML décrivant la mission à partir de ses paramètres opérationnels. Enfin, il permet la lecture puis l'affichage d'un plan de vol écrit en JSON sur la carte 2D, afin de charger des missions déjà décrites précédemment.

5.5.6 Module d'intégration avec Paparazzi

Ce module permet d'échanger des données avec le système Paparazzi. Il adapte l'exportation de fichiers XML à destination de Paparazzi, de façon à ce que la mission soit prête à être chargée dans l'auto-pilote sans aucune autre

4. <https://maptalks.org/>

modification. Il permet aussi de connaître la position du drone sur l'interface de SafeCoop en temps réel ou à partir du rejeu d'un vol passé. Le franchissement des tampons de sécurité décrites dans SafeCoop déclenche des événements sur la station de contrôle au sol, notamment les procédures de contingence et d'urgence. Les messages venant de la station de contrôle Paparazzi sont écoutés via un bus Ivy [42] et ceux intéressant l'aéronef sont transformés en GeoJson et transférés au module de gestion de la mission. Enfin, il permet d'importer un plan de vol en XML de Paparazzi pour le représenter sur la carte et obtenir les paramètres opérationnels en JSON.

5.5.7 Module de gestion de la mission

Ce module permet de faire le lien entre tous les modules, pour propager les modifications d'un élément à tous les autres qui lui sont liés. Pour illustrer, la modification d'une hauteur de vol change une trajectoire, sa valeur dans le plan de vol ainsi que le marqueur de sa hauteur, puis est répercutée sur le calcul des dimensions des ses tampons de sécurité et donc leur présentation, et enfin la carte 3D doit être mise à jour en conséquence.

En conclusion, ce *toolkit* contient les briques de base pour concevoir des systèmes permettant de manipuler les paramètres opérationnels sur une carte ; depuis leur représentation, la gestion des événements puis les comportements ou calculs à réaliser par la suite. Il peut être facilement étendu car il est écrit en Javascript, sans être un greffon à part entière de Leaflet. Les objets manipulés sur la carteinstancient la classe *Marker* de Leaflet pour la plupart. Naturellement, les contrôles étendent la classe *Control*.

Notre objectif n'était pas de concevoir un produit complet et répondant à toutes les problématiques, mais de soutenir P1 dans son étude. Nous avons prototypé les interactions explorées lors des ateliers. D'autres PO intéressants comme les conditions météorologiques ou l'état du système ont été évoqués mais n'ont pas été traités dans notre étude. Toutefois, à partir des briques disponibles dans SafeCoop Toolkit, l'ajout de nouveaux PO et la création d'interactions pour les manipuler sera facilitée. Ainsi, le travail des futurs concepteurs consistera davantage à découvrir puis concevoir les interactions importantes à réaliser sur les PO, plutôt que dépenser des ressources à développer ces interactions à partir de rien.

5.6 Discussion

Notre étude longitudinale avec un opérateur et les groupes de discussion qui ont suivi nous ont permis d'explorer et de caractériser notre concept. Dans cette section, nous discutons des forces et des limites de notre travail pour soutenir la sécurité des opérations de drone.

5.6.1 Support de la sécurité avec l'analyse géovisuelle

Nous avons montré que le **concept de représentation et de manipulation des paramètres opérationnels d'une opération sur une carte s'avère efficace pour la planification de mission et l'évaluation de la sécurité**. Les résultats des groupes de discussion avec des contrôleurs aériens professionnels et des régulateurs indiquent également que **notre approche pourrait également servir de base pour l'évaluation et la visualisation d'opérations plus importantes et plus complexes**. Nous avons également recueilli des preuves de l'utilité de notre concept pour favoriser la compréhension de l'opération et soutenir la discussion entre les différentes parties prenantes sur les impacts possibles des paramètres opérationnels sur la sécurité.

L'approche de l'analyse géovisuelle a été particulièrement appréciée par P1 et les régulateurs lors du focus group. Ils ont tous exprimé que l'ajustement des PO pour visualiser les vols envisagés et estimer leur impact sur la sécurité opérationnelle pourrait accélérer les processus de demande d'autorisation et d'étude de sécurité et les rendre plus sûrs (RC2, RC4). P1 a apprécié l'interaction spécifique pour la saisie des trajectoires que l'on retrouve habituellement sur les stations de contrôle au sol tout en bénéficiant de plusieurs couches de données et d'informations pertinentes sur son contexte de mission. L'approche de l'analyse géovisuelle s'adapte également bien à la méthodologie SORA. En effet, dans le modèle sémantique de SORA ([104]), la détermination des risques au sol et dans les airs tient compte de la géographie du vol, des volumes de contingence et d'urgence, et des zones adjacentes qui sont toutes des données spatiales. Ainsi, **la visualisation et l'exploration des informations relatives à la sécurité directement sur une carte peuvent réduire la charge de travail en évitant les allers-retours entre les données spatiales et textuelles** (RC6).

La possibilité d'étendre notre concept à des paramètres opérationnels supplémentaires est importante car notre prototype peut accepter des données provenant de la plupart des sources en ligne ou hors ligne. Le principal défi consiste à rendre les données visibles et manipulables à l'aide de paramètres visuels pertinents et d'une interaction adéquate, afin que la sécurité puisse être évaluée visuellement. Pour faciliter le processus d'extension du prototype, nous avons inclus une interaction générique pour manipuler les formes et les points sur la carte, notamment le positionnement, la mise à l'échelle, les changements de couleur ou l'ajout d'infobulles. Nous avons également inclus des outils permettant de calculer les intersections ou les chevauchements entre les formes ou les distances entre les éléments afin d'ajouter de nouvelles fonctionnalités liées à la sécurité en fonction du cas d'utilisation considéré. Ces outils sont disponibles sous la forme d'une bibliothèque javascript, utilisable avec Leaflet : **SafeCoop Toolkit**.

5.6.2 De la description du concept d'opérations à l'exécution

Lors de notre travail longitudinal avec P1, notre prototype lui a permis d'exprimer et de réfléchir à l'opération qu'il devait mettre en œuvre ou son Conops (RC1). Les participants au groupe de discussion ont noté la capacité de notre prototype à rendre les Conops facilement compréhensibles pour les autres parties prenantes et à fournir un format unifié pour le partage des opérations de drones avec des éléments de sécurité (RC7). **Le prototype a permis à P1 de définir son concept d'opération.**

Les éléments visuels liés à la sécurité tels que les limites de l'aéroport et les tampons ont aidé P1 à spécifier les paramètres opérationnels tels que l'altitude ou les trajectoires. Le prototype lui a ensuite permis d'étudier la sécurité de l'opération.

L'interaction pour exporter des captures d'écran avec des couleurs correspondant aux figures et documents existants dans son document de concept d'opérations a facilité l'élaboration des documents pour l'obtention de l'autorisation opérationnelle (RC7). **Le prototype a fourni des éléments constitutifs de son dossier de demande d'autorisation d'exploitation en catégorie spécifique à P1.**

Paparazzi [114], un pilote automatique de drone et sa station de contrôle au sol, a été intégré au prototype pour faciliter les tests et l'exécution de l'opération. Des essais ont été effectués pour vérifier et valider cette intégration. Nous avons ainsi mis sur pied un cadre unifié pour les trois phases d'une opération de drones. Le prototype peut prendre en charge **l'intégralité du cycle de vie d'une opération par drone**, depuis la description des Conops, l'évaluation de la sécurité opérationnelle avec la politique de pilotage automatique correspondante et les fichiers requis pour la demande d'autorisation dans la catégorie d'opérations spécifique, l'exportation des intentions et des plans de vol, la surveillance du vol en temps réel et la sauvegarde des données de vol pour l'analyse après le vol ou le signalement des incidents.

5.6.3 Limites et perspectives de recherche

Sur la validité du concept

Nous nous concentrons sur un utilisateur unique. Cependant, le fait d'avoir envisagé d'autres scénarios et d'avoir recueilli les commentaires d'autres intervenants professionnels a apporté de la validité au concept proposé. Nous souhaitons poursuivre notre travail avec d'autres opérateurs de drones afin d'évaluer la capacité de notre concept et de notre prototype à s'adapter à d'autres exigences et à concevoir de nouvelles interactions pertinentes. Nous souhaitons également mener des expériences plus formelles avec plusieurs utilisateurs planifiant une opération similaire avec et sans notre prototype afin de mieux évaluer sa capacité à soutenir la sécurité. Cela nous permettra de recueillir des données qualitatives et quantitatives pour consolider la validation du concept.

Sur les interactions et l'extension du prototype

Parmi toutes les idées qui ont émergé de cette recherche, certaines n'ont pas pu être intégrées au prototype, soit parce qu'elles ne correspondaient pas à nos cas d'utilisation, soit parce qu'elles ont été écartées pendant les ateliers pour des raisons techniques. Dans certains cas, nous n'avons pas été en mesure de calculer l'impact de certains paramètres opérationnels sur la sécurité. Par exemple, l'impact du vent sur les tampons de sécurité dépendait fortement du drone utilisé et nécessitait des modèles adéquats que nous n'avons pas pu trouver. L'utilisation d'outils existants fournissant des risques au sol en fonction de paramètres opérationnels tels que Drosera [227] pourrait étendre les fonctionnalités et améliorer notre prototype. En ce qui concerne la validité de nos données, nous reconnaissons qu'un groupe de discussion n'est pas un test utilisateur. Il existe des différences entre ce que les gens disent et ce qu'ils font : des observations plus directes consolideraient la validité du concept pour d'autres cas d'utilisation. Bien que les parties prenantes aient reconnu la valeur de l'outil et l'efficacité du concept exposé dans ce travail, des tests utilisateurs seraient la prochaine étape pour une validation approfondie. Compte tenu du retour positif de l'opérateur et des autres parties prenantes, la première étape de la validation est atteinte mais d'autres expérimentations sont nécessaires.

Nous pensions effectuer des expérimentations contrôlées pour confirmer ces résultats, pour vérifier que l'utilisabilité était améliorée en même temps que la sécurité était maximisée. Cependant, un état de l'art réalisé sur les techniques de comparaison des résultats issus de l'étude de sécurité d'une même situation a montré qu'il restait d'autres verrous scientifiques à lever : la SORA est qualitative et doit être suppléée par d'autres méthodes pour obtenir des résultats quantifiables [74, 247] et il n'existe pas de méthode pour comparer deux à deux et classer le résultat d'une SORA sur une même situation.

D'autre part, des idées d'interactions proposées par les participants pendant les groupes de discussion peuvent être approfondies, comme montrer l'écart entre un conops quelconque et un scénario prédéfini ou un module réalisant une SORA complète. Notre approche s'est concentrée sur l'analyse géovisuelle. Cependant, la méthodologie SORA ne peut pas être entièrement conduite sur une carte uniquement. Certains éléments n'ont pas de composante géographique comme la vérification de la conception des drones ou la formation des pilotes. L'intégration des données textuelles et spatiales avec un codage graphique cohérent et éventuellement des liens directs entre les données textuelles et spatiales est également une perspective de notre travail pour fournir un espace de travail unifié pour planifier les opérations des drones et évaluer leur sécurité.

Sur la communication et l'aspect collaboratif

Concernant la communication, les contrôleurs aériens et les régulateurs n'ont pas jugé prioritaire d'avoir un canal de communication par le biais de la carte. Ils ont expliqué que cela s'empilerait avec leurs outils existants tels que le courrier électronique ou le téléphone. Les régulateurs ne veulent pas travailler avec les

opérateurs sur un document partagé car ils ont besoin de versions statiques des fichiers pour travailler.

Parmi les perspectives, nous pensons qu'il existe d'autres possibilités de soutenir la collaboration avec d'autres autorités et parties prenantes. Afin d'implémenter RC9, un exemple serait d'adapter les outils de communication déjà existants. Le régulateur a évoqué l'utilisation du Module d'Echange et de Télétransmission avec les ORganismes (METEOR⁵) de la Direction Générale de l'Aviation Civile. Afin d'implémenter RC5, un autre exemple serait de créer un outil permettant la mutualisation des informations déjà acceptées par les régulateurs, puis les stocker dans une base de données distribuée, anonymisée et amputée des détails commerciaux sensibles. En effet, il a été montré que les informations issues de la foule (*crowd-sourcing*) étaient aussi précises que celles des fournisseurs professionnels [191] et cela pourrait être appliqué aux sources de données à utiliser pour les opérations de drone.

5.7 Résumé

Nous avons présenté notre travail visant à concevoir et prototyper des interactions soutenant la préparation et l'évaluation des risques des missions complexes de drones. Nous avons introduit un concept consistant à représenter les paramètres opérationnels sur une carte et à permettre leur manipulation pour faciliter la description des Conops et évaluer leur sécurité. Au cours d'une étude longitudinale avec un opérateur et de deux groupes de discussion avec des contrôleurs aériens et des régulateurs, nous avons exploré notre concept et évalué sa capacité à accélérer la phase de préparation de la mission et d'évaluation des risques. Nous avons implémenté un cadre pour les trois phases d'une opération de drones, au sein d'un même prototype. Nous avons aussi constaté que notre approche peut accélérer les étapes de planification et de demande d'autorisation tout en améliorant l'identification et l'atténuation des risques, favorisant ainsi la sécurité. Nous avons également constaté qu'elle peut faciliter le partage d'informations avec d'autres parties prenantes et être utilisée depuis le début de la conception jusqu'à l'exécution effective de la mission, fournissant ainsi un environnement unifié pour des opérations de drones plus sûres. Les travaux futurs se concentreront sur l'étude d'autres cas d'utilisation, l'intégration de fonctions de sécurité supplémentaires comme le risque au sol, et la réalisation d'expériences plus contrôlées avec un plus grand nombre d'opérateurs de drones et de pilotes afin de recueillir des statistiques pour une validation quantitative. Enfin, l'intégration de ce concept dans un système UTM est également une piste de recherche.

Contributions

Selon la triangulation [187], les contributions présentées ici sont :

5. <https://meteor.dsac.fr/>

1. de nature empirique : des données de terrain pour l'activité de planification de missions par les opérateurs et les pratiques des régulateurs ;
2. de nature théorique :
 - les paramètres opérationnels comme éléments de base pour la description et la manipulation des opérations de drones et l'organisation de la collaboration autour de ces dernières ;
 - le concept d'analyse géovisuelle appliquée aux études de sécurité des missions de drones ainsi que sa validation ;
3. et en matière de design :
 - la représentation et l'interaction avec les paramètres opérationnels suivants : limites d'une zone, trajectoires de décollage et d'atterrissage des avions, points intéressants la mission, trajectoires du drone, hauteur de vol, zones tampons de sécurité et acteurs de la mission ;
 - des interactions qui implémentent le concept et les recommandations RC1, RC2, RC4, RC6 et RC7 ;
 - SafeCoop Toolkit, une bibliothèque générique de ces interactions en Javascript ;
 - et un prototype qui soutient la réalisation d'une mission de drones au sein d'un cadre unifié, depuis la préparation de mission, le suivi de l'exécution et permettant le jeu pour la phase après-vol : SafeCoop.

Chapitre 6

Conclusion Et Perspectives

"It is the time you have wasted for your rose that makes your rose so important."

– Antoine de Saint-Exupéry

"Done is better than perfect."

– Sheryl Sandberg

Les objectifs de cette thèse sont de caractériser les aspects importants des processus d'étude de sécurité et de demande d'autorisation afin de soutenir la sécurité des opérations commerciales de drones civils en catégorie d'exploitation spécifique, ainsi que d'identifier et évaluer des possibilités de rendre ces processus plus utilisables. Ce chapitre présente un bilan des contributions ainsi que les directions de recherche future.

6.1 Bilan des contributions

Nous proposons une photographie de la littérature sur le support à la sécurité des missions de drones grâce à une RSL. Jusqu'à maintenant, les recherches se sont concentrées sur les petits drones, pour les opérations en hors-vue et durant leur phase de vol. La phase de préparation de mission est celle qui dure le plus longtemps et est relativement peu étudiée par rapport à celle du vol. Nous détaillons les contributions de l'approche IHM pour soutenir la sécurité des missions de drones selon les tâches, catégories en IHM et étapes de la mission. Peu de recherche sont consacrées aux études de sécurité à base de représentations cartographiques pour l'étape de demande d'autorisation, alors que les autres étapes les utilisent en majorité. Les recommandations de conception issues de notre RSL sont synthétisées pour servir aux autres chercheurs et aux concepteurs de systèmes.

D'un point de vue théorique, sur la base d'entretiens avec des opérateurs de drones, nous proposons **une modélisation en trois étapes de la préparation d'une mission complexe de drones**. Ces contributions ont été

consolidées par un questionnaire de suivi, complétant ainsi les prescriptions réglementaires. Nous identifions la notion de **paramètres opérationnels** comme élément de base d’une étude de sécurité et comme élément facilitant la collaboration entre les différents acteurs des processus, sous une forme graphique ainsi que sous une forme textuelle. Nous proposons le **concept d’analyse géovisuelle** pour concevoir des outils interactifs soutenant la réalisation et la validation des études de sécurité. Finalement, nous présentons **neuf recommandations pour la conception des futurs systèmes plus utilisables pour la préparation de missions de drone plus sûres** :

- RC1 : Établir le concept d’opération (objectif de la mission, faisabilité technique et réglementaire) en synchronisation avec le client.
- RC2 : Utiliser systématiquement les paramètres opérationnels pour décrire une mission.
- RC3 : À partir des paramètres d’une mission, soutenir l’identification des éléments de la réglementation concernant l’opération.
- RC4 : Soutenir l’exploration des paramètres opérationnels et estimer leurs impacts sur la sécurité de la mission.
- RC5 : Développer des outils utilisables pour soutenir la production de données fiables du point de vue du régulateur ou l’atténuation des données non fiables.
- RC6 : Soutenir la représentation et de la manipulation des paramètres opérationnels sur les cartes.
- RC7 : Fournir des gabarits réutilisables et exploiter les concepts de chaînes éditoriales : permettre la gestion des versions ; automatiser l’inclusion d’éléments, mettre à jour les liens entre les éléments puis pour générer les documents requis.
- RC8 : Soutenir l’identification anticipée des tiers, des protocoles et des délais pour les autres autorisations requises.
- RC9 : Permettre à toutes les parties prenantes de prendre conscience de l’état actuel de la demande.

Trois catégories peuvent grouper les recommandations :

- **l’automatisation**, où les paramètres opérationnels sont manipulés et recalculés par le système ou des parties de documents sont générées par celui-ci afin de soustraire les tâches répétitives ou difficiles à l’utilisateur (RC2, RC4, RC7, RC8) ;
- le **soutien à la créativité et à la réflexion** permettant d’explorer des solutions pour maximiser la sécurité avant de prendre sa décision (RC1, RC3, RC4, RC6), que nous qualifions d’*interactions orientées-sécurité* ;
- le **travail collaboratif** pour faciliter la coordination et la communication entre toutes les parties prenantes (client, opérateur, régulateur et autres parties intéressées) afin d’optimiser la production de l’étude de sécurité (RC1, RC5, RC7, RC9).

D’un point de vue empirique, nous avons réalisé une étude de terrain sur

les parties prenantes des missions complexes de drones. Nous avons recueilli de nombreux retours d'expériences de professionnels des drones issus de différentes industries en même temps qu'une description de leurs pratiques lors de la préparation de mission.

Nos données indiquent que : 1) la réglementation, son interprétation, les différents acteurs et leurs rôles, la diversité de possibilités des missions, de mitigations, l'inadaptation des outils utilisés par les exploitants, le manque de coordination et de conscience partagée des statuts des demandes d'autorisation ainsi que leur processus de validation au cas par cas par les régulateurs rendent le processus long et complexe ; 2) que les outils actuellement utilisés ne permettent pas d'intégrer toutes les phases d'une mission de drone, proposent des représentations hétérogènes aux utilisateurs et ne sont pas dédiés à soutenir les tâches évoquées précédemment ; 3) les données utilisées sont cruciales pendant la préparation des missions, elles devraient être accessibles, fiables et facilement exploitables ; 4) la sécurité peut être améliorée en présentant des informations de contexte, en soutenant l'exploration et l'ajustement des paramètres opérationnels afin de faciliter la description des opérations ainsi qu'en soutenant l'identification des risques et la prise de décision pour le choix des moyens d'atténuation.

Nous avons également identifié des aspects importants concernant le soutien de la sécurité.

Tout d'abord, il s'agit d'un **processus créatif**, pour résoudre des problèmes réels et spécifiques à chaque opération, associé à une obligation de justifications réalistes, solides et acceptés comme tels par une tierce autorité. Il ne se résume pas à une liste générique de tâches à faire.

La **culture de la sécurité des acteurs** influencent leur niveau de perception des risques. Plusieurs points de vue sur la sécurité existent. Une partie des opérateurs pensent que la sécurité concerne seulement l'absence d'accidents ou d'incidents en vol. La littérature se concentre aussi sur la phase de vol. Une autre partie des opérateurs, surtout ceux ayant eu une expérience précédente dans l'aviation, ainsi que les régulateurs reconnaissent l'importance de tenir compte et de tirer profit des trois phases d'une mission pour la gestion de la sécurité.

Un **cadre unifié pour les trois phases de la mission** améliore la sécurité. Quand les outils de préparation de mission sont liés à la station de contrôle au sol, cela facilite le vol proprement dit. Le workflow entre les deux tâches est fluidifié et le suivi de la mission sur l'interface utilisée pour sa préparation donne accès à tout le contexte à la différence des stations de contrôle qui n'en tiennent pas compte. Ensuite, cela permet d'offrir des outils proposant le rejeu après le vol pour la gestion réactive de la sécurité ainsi que la simulation des futurs vols pour sa gestion proactive.

Il existe une **tension entre la rapidité de réalisation d'une tâche au détriment des efforts nécessaires pour bien y réfléchir**. En effet, un document rempli ne signifie pas qu'il est rempli comme il le faut et que les résultats attendus sont acceptables.

Pour le moment, il n'existe **pas d'outil pratique pour mesurer quan-**

titativement le gain en sécurité, surtout pour les missions nécessitant des études SORA. L'assurance du gain en sécurité est donc difficile à obtenir. Dans le cas des missions complexes, la SORA est qualitative et est subjective par rapport au jugement de celui qui la réalise [95]. Pour le moment, les moyens pour quantifier exactement le niveau de sécurité en sortie restent à l'étude [74, 247].

Enfin, l'**aspect collaboratif de la sécurité** est minimisé par les prescriptions réglementaires et cela peut impacter négativement la sécurité ainsi que l'utilisabilité.

D'un point de vue design, nous avons conçu des **représentations et des interactions avec les PO** tels que les points intéressant la mission, ses limites, les hauteurs et les trajectoires du drone avec le calcul des tampons de sécurité correspondants ainsi que les différents acteurs impliqués durant la phase d'exécution du vol. Des interactions implémentent le concept d'analyse géovisuelle et les recommandations RC1, RC2, RC4, RC6 et RC7 que nous avons théorisées. Ces **interactions orientées sécurité** sont intégrées à un prototype nommé **SafeCoop**, qui a été testé en conditions réelles. Il propose un **cadre unifié** pour la réalisation d'une mission de drones, en couvrant les trois phases : la préparation, l'exécution du vol et l'après-vol. Enfin, **SafeCoop Toolkit** est une bibliothèque d'interactions soutenant la sécurité des missions de drone sur une carte, utilisant la représentation et la manipulation des paramètres opérationnels, ainsi que l'échange des données de la mission.

6.2 Discussion

Dans le domaine des opérations de drones, en plus des futurs systèmes, les contributions peuvent aider à mieux comprendre les exploitants, et permettre de créer des dispositifs ou des programmes de formation pour aligner leurs compétences avec celles qui sont attendues, telle que la culture aéronautique, le niveau de robustesse des justificatifs à produire, etc. Le toolkit pourra être étendu pour d'autres types de missions, voire pour une commercialisation de la préparation de mission en tant que service en ligne. Le concept d'analyse géovisuelle a été utilisé pour les drones, mais toute autre étude de sécurité dans d'autres domaines pourrait en bénéficier.

La gestion du trafic de drones (*UTM*) pourrait tirer profit de nos contributions. D'une part, comme elle vise à automatiser l'autorisation de toutes les missions, elle devra donc tenir compte des cas plus complexes dont cette thèse traite. Toutefois, ces cas complexes ne peuvent être traités que manuellement pour le moment. Les contributions de cette thèse peuvent aider les chercheurs à mieux comprendre le travail réel pour mieux outiller les professionnels pour faciliter le traitement actuel. En outre, les concepts proposés ici peuvent servir de base pour l'automatisation de cette autorisation. Nous le détaillons dans la section suivante.

D'autre part, le concept de paramètres opérationnels permettra d'imaginer et de créer de nouveaux services. Par exemple, la connaissance de tous les PO des missions prévues ou en cours peut permettre de créer des systèmes sachant optimiser à la fois la sécurité et les impératifs sociaux (transport médical, urgence) ou économiques (bénéfice commercial) pour les futurs algorithmes de déconfliction avant le vol ou durant son exécution. Les résultats de ces travaux peuvent aussi bénéficier à la gestion du trafic aérien avec pilotes à bords, car à terme les espaces aériens seront partagés entre l'aviation conventionnelle et les drones.

D'autres acteurs pourraient aussi bénéficier des contributions de cette thèse, comme les militaires, les préfectures, etc. Maintenant qu'ils sont identifiés comme partie prenante du système, ils devront aussi être outillés pour réaliser pleinement leur rôle : autorisation, vérification et suivi. Les concepteurs de futurs système peuvent envisager de proposer des outils pour ces autres acteurs.

Les contributions de cette thèse pourront être utilisées pour soutenir la sécurité des autres types de véhicules pilotés à distance : aquatiques, spatiaux ou évoluant au sol. En effet, pour les missions complexes, l'exploitation de ces véhicules doit faire l'objet d'une préparation de mission avant un déploiement. Le cadre unifié devrait permettre de réaliser des simulations ainsi que des essais en conditions réelles.

Les recommandations et les outils pour la collaboration peuvent être appliquées aux domaines du service public ou privé, quand une demande d'autorisation est nécessaire : partager une conscience de la situation mutuelle du statut d'une demande, automatiser la génération de documents, produire des sources de données fiables et facilement exploitables à la fois par les systèmes et les humains ainsi que faciliter le travail synchrone.

6.3 Bilan méthodologique

Une RSL n'est pas infaillible, car son exhaustivité dépend des critères de sélection qui incluent les sources consultées. De plus elle est chronophage. En revanche, lire et exploiter la richesse documentaire accumulée garantit d'avoir une bonne photographie récente de l'état de l'art sur la question à étudier.

La pandémie de Covid-19 a forcé la plupart des entretiens à se faire en ligne. L'éloignement et les caprices des logiciels de vidéo conférence peuvent parfois rendre la tâche difficile. Quant au questionnaire en ligne, la collecte des réponses était facilitée car la taille de notre échantillon était faible. Soumettre le modèle et les recommandations à une population plus vaste d'opérateurs, en Europe par exemple, pourrait donner d'autres résultats intéressants comme un modèle applicable aux exploitants européens.

Les séances de conception participative ont nécessité une organisation particulière et une adaptation de ma part, par rapport à mon expérience précédente en développement, à cause de la rigueur académique requise pour tout documen-

ter. Refaire le même exercice avec d'autres exploitants et d'autres cas d'usage amèneront de nouvelles interactions, complétant celles déjà conçues. Cela sera conditionné par l'accès aux participants. Leur disponibilité sera cruciale.

6.4 Perspectives

De nombreuses pistes de recherche ont été identifiées et sont en cours d'exploration. A part les recommandations implémentées dans SafeCoop, les RC3 et RC8 font déjà l'objet de logiciels disponibles pour les utilisateurs. Les RC5 et RC9 ne sont pas explorées.

Pour l'axe de l'automatisation, des recommandations sont partiellement implémentées par les outils actuels : *RC3 - À partir des paramètres d'une mission, soutenir l'identification des éléments de la réglementation concernant l'opération* et *RC8 : Soutenir l'identification anticipée des tiers, des protocoles et des délais pour les autres autorisations requises*. Ces solutions sont concentrées sur l'aspect réglementaire : identifier les interlocuteurs pour les missions pour une zone donnée et obtenir leurs contacts, alors que la partie *étude de sécurité*, pour s'assurer que la sécurité est à un niveau suffisant, notamment par l'application de la SORA, est encore peu exploitée. Parmi ces services, certains proposent la SORA mais décorrélée de l'aspect réglementaire. Dans leur cas, réaliser une SORA consiste à remplir une séquence de formulaires en choisissant la valeur des critères SORA à chaque étape. Ces services aident l'utilisateur à dérouler rapidement la SORA mais ne lui proposent pas de réfléchir, ou de faire varier les paramètres de la SORA afin de trouver le meilleur équilibre entre sécurité et objectifs de la mission.

Pour pallier cela, forts des connaissances accumulées durant la thèse, nous avons commencé l'implémentation d'un système expert permettant l'étude de sécurité assistée par ordinateur ou *Computer Assisted Drone Operations Risk Assessment* (CADOR). Il permet d'identifier la catégorie de l'exploitation à partir des paramètres opérationnels d'une mission puis de réaliser une SORA si nécessaire. En modifiant leurs valeurs des paramètres opérationnels, la catégorie d'exploitation et le résultat de la SORA sont recalculés en conséquence. Il s'agit d'un démonstrateur de RC2, RC3, RC4 et RC8 mais sa validation n'a pas pu être poursuivie pour le moment car il existe un verrou scientifique. En effet, il manque une méthode objective et quantitative pour démontrer le gain en sécurité et en efficience obtenu par CADOR avec la SORA, par rapport aux autres outils. Un autre problème de recherche serait alors d'étudier la comparaison des produits d'études SORA afin de les comparer quantitativement et déterminer celle avec le niveau de sécurité le plus élevé. Des travaux supplémentaires sont également nécessaires pour lier le concept d'analyse géovisuelle avec le moteur d'inférences du système expert, pour tirer profit de *RC6 : Soutenir la représentation et de la manipulation des paramètres opérationnels sur les cartes*.

Pour l'axe du soutien à la créativité et à la réflexion, si nous voulons conso-

luder nos résultats, il faudra comparer le produit de deux études de sécurité se basant sur la SORA pour la même situation afin de faire des expérimentations et de valider que nous maximisons la sécurité en même temps que nous améliorons l'utilisabilité. Les méthodes de mesure de cette dernière sont déjà établies [243].

Enfin, explorer d'autres cas d'usage permettrait de trouver de nouveaux PO à étudier. La recherche sur les façons de les représenter et les manipuler efficacement constituent un défi, surtout si les missions se font dans le futur U-space, avec les concepts tels que les vertiports, les déconflctions stratégiques et tactiques ou encore la maîtrise de la congestion. Les systèmes et les interactions devront être adaptés.

Par exemple, pour le transport de personnes par drones entre deux vertiports, il faudrait identifier les besoins qui diffèrent des cas traités pendant la thèse, puis identifier les PO nécessaires pour décrire la mission et influençant son étude de sécurité. Les objectifs seront d'ajouter les autres interactions nécessaires pour permettre ce type de mission puis de créer un scénario générique pour les vertiports. Ainsi pour les prochaines missions et aux autres endroits, appliquer ce scénario permettra d'avoir les bons calculs et les bonnes représentations, et l'opérateur se concentrera sur la maximisation de la sécurité en explorant les différentes possibilités.

Un autre exemple, pour la déconflction stratégique, les paramètres opérationnels de chacun des aéronefs évoluant dans une zone non ségréguée pourrait permettre de simuler les possibilités de situation d'urgence et de conflits. Il faudra pouvoir les représenter à l'utilisateur final afin qu'il puisse explorer les différentes valeurs pour décider de celles qu'il retiendra pour sa mission. Et pendant le vol, si nécessaire, lui présenter les paramètres opérationnels sensibles pour tous les aéronefs pouvant l'impacter ainsi que leurs valeurs en temps réel afin qu'il prenne la meilleure décision en cas de problème. De telles études nécessitent plusieurs expertises comme la supervision de flotte, les procédures opérationnelles de l'aviation, des calculs avancés de trajectoires et la dynamique des aéronefs, ... et donc de mettre en oeuvre la conception participative avec les futures parties impliquées.

Quoi que bien identifié, l'axe du travail collaboratif reste superficiellement abordé dans cette thèse et mériterait d'être approfondi. Cependant, la nature collaborative du processus, l'interactivité requise, les prescriptions réglementaires et les difficultés que résolveraient l'implémentation de ces recommandations en font de bonnes perspectives de recherche pour l'IHM. Les recommandations *RC5 : Développer des outils utilisables pour soutenir la production de données fiables du point de vue du régulateur ou l'atténuation des données non fiables* et *RC9 : Permettre à toutes les parties prenantes de prendre conscience de l'état actuel de la demande* constituent des perspectives de recherche importantes tant pour leur caractérisation, les nouveaux concepts qui en découleraient que pour la validation.

Pour la RC9, le régulateur ne peut pas fournir un statut de l'avancement des demandes de chacun des opérateurs et idéalement, le système serait soit répliqué

soit partagé dans les différents pays européens. Afin de ne pas ajouter la charge aux opérateurs, un futur système possible devrait répondre à certaines problématiques : que chacun puisse voir les informations le concernant et concernant sa mission, bien entendu décrite via les PO. A partir de là, chaque modification devrait être accessible et notifiée à toute partie intéressée (l'opérateur, son équipage, les acteurs tiers). Une approche serait d'utiliser une base de données distribuée, pour mutualiser l'hébergement du service entre tous les opérateurs et cryptée, pour la confidentialité due au respect de la vie privée et au secret professionnel, avec des traitements automatisés et des notifications à chaque événement important. Un tel système a été étudié pour des transactions commerciales impliquant des drones, mais non pas pour soutenir la collaboration entre des opérateurs et des régulateurs [255]. Il faudra étudier les interactions pour utiliser un tel système et leur intégration avec l'environnement de travail habituel des exploitants, afin de ne pas créer un énième logiciel à utiliser pendant la préparation et l'exécution de missions. Encore une fois, la conception participative sera de mise pour prendre en compte l'activité réelle.

Pour la RC5, s'appuyer sur la participation des différents opérateurs ou approvisionnement par la foule (*crowdsourcing*) pour avoir des données déjà plus fiables est une perspective. En effet, la recherche a prouvé que les données cartographiques fournies par la foule étaient plus précises que celles des autres fournisseurs [191, 129], au moins pour les milieux urbains. En cherchant les bénéfices du crowdsourcing [192], il serait intéressant d'étudier comment implémenter RC5 et l'associer aux PO, en s'inspirant de [51] pour la méthode en servant de facilitateur. Une des contraintes, à étudier ou au moins à prendre en compte, serait que de grandes distances sont franchies en longue élongation, et donc que les données fournies soient moins fiables. Ensuite, convaincre l'autorité afin qu'elle reconnaisse la fiabilité d'une telle source de données reste un enjeu majeur.

A moyen terme, utiliser plusieurs drones en vol en même temps sera autorisé, sous certaines conditions. Le nombre de drones d'une mission est un paramètre opérationnel, mais il multiplie le nombre de trajectoires à manipuler en même temps que la probabilité d'accident entre les aéronefs et au sol. Etudier l'application des concepts présentés dans cette thèse pour ces missions et les adapter pour les essaims de drones sont une perspective de cette thèse. Le concept de paramètres opérationnels pour décrire la mission restera valide, mais il faudra ajouter de nouveaux éléments. Le concept d'analyse géovisuelle resterait valide si le nombre d'éléments de l'essaim reste en dessous d'un certain seuil, qui sera à découvrir. Ensuite, il faudra trouver comment soutenir la créativité et la réflexion de l'opérateur avec ces trajectoires multiples ainsi que fournir des moyens de vérification pour le régulateur.

A plus long terme, l'objectif de la vision européenne de la gestion du trafic de drones sera fortement connectée et automatisée. L'étude de sécurité et l'autorisation des missions complexes devront à un moment ou un autre être automatisées. L'association de CADOR - système expert à base de règles - avec

les techniques d'apprentissage automatique permettraient *une approche hybride* [47] pour réaliser les études de sécurité afin d'autoriser les missions complexes, au sein d'un service. Mais il faudra constituer assez de données pour que cette recherche soit possible, et celles-ci devront nécessairement être traitées d'abord par les utilisateurs. De plus, il faudra que l'organisation et la forme des produits issus de ces études de sécurité ainsi que les retours des régulateurs soient cohérents pour faciliter leur future exploitation. Cela renforce l'utilité des interactions orientées sécurité qui devront d'abord être étudiées, développées puis rendues disponibles aux utilisateurs finaux afin que ces derniers réalisent les études de risques et que les régulateurs les évaluent jusqu'à leur validation. Les concepts et les recommandations seront utiles pour faire des systèmes utilisables, dont les résultats auront une présentation cohérente grâce aux PO. En sortie, le niveau de sécurité des opérations aura été validé par les régulateurs. La production de telles études de sécurité et leur accumulation constitueront ensuite les données pour la seconde étape, mettant en oeuvre l'apprentissage automatique.

Bibliographie

- [1] Pradeep Abeygunawardana, Narmada Gamage, Lanka De Alwis, Shalika Ashan, Chathura Nilanka, and Pasan Godamune. E-medice – autonomous drone for healthcare system. In *2021 International Conference on Computing, Communication, and Intelligent Systems (ICCCIS)*, pages 994–999, 2021.
- [2] Federal Aviation Administration. Building your operational risk assessment, 2019. https://www.faa.gov/uas/resources/events_calendar/archive/2019_uas_symposium/media/Building_Your_Operational_Risk_Assessment.pdf.
- [3] Adobe. A Guide to Experience Mapping for UX Design, 2020.
- [4] Shubhani Aggarwal and Neeraj Kumar. Path planning techniques for unmanned aerial vehicles : A review, solutions, and challenges. *Computer Communications*, 149 :270 – 299, 2020.
- [5] Ankit Agrawal, Sophia J. Abraham, Benjamin Burger, Chichi Christine, Luke Fraser, John M. Hoeksema, Sarah Hwang, Elizabeth Travník, Shreya Kumar, Walter Scheirer, Jane Cleland-Huang, Michael Vierhauser, Ryan Bauer, and Steve Cox. The next generation of human-drone partnerships : Co-designing an emergency response system. page 1–13, 2020.
- [6] Ankit Agrawal, Seyedehzahra Khoshmanesh, Michael Vierhauser, Mona Rahimi, Jane Cleland-Huang, and Robyn Lutz. Leveraging artifact trees to evolve and reuse safety cases. page 1222–1233, 2019.
- [7] Ahmed Alamouri, Astrid Lampert, and Markus Gerke. An exploratory investigation of uas regulations in europe and the impact on effective use and economic potential. *Drones*, 5(3), 2021.
- [8] Víctor Alarcón, Manuel García, Francisco Alarcón, Antidio Viguria, Ángel Martínez, Dominik Janisch, José Joaquín Acevedo, Ivan Maza, and Aníbal Ollero. Procedures for the integration of drones into the airspace based on u-space services. *Aerospace*, 7(9) :128, 2020.
- [9] Chandykunju Alex and Aditya Vijaychandra. Autonomous cloud based drone system for disaster response and mitigation. In *2016 International Conference on Robotics and Automation for Humanitarian Applications (RAHA)*, pages 1–4, 2016.

- [10] Azza Allouch, Anis Koubaa, Mohamed Khalgui, and Tarek Abbes. Qualitative and quantitative risk analysis and safety assessment of unmanned aerial vehicles missions over the internet. *IEEE ACCESS*, 7 :53392–53410, 2019.
- [11] Ihab L. Hussein Alsammak, Moamin A. Mahmoud, Hazleen Aris, Muhanad AlKilabi, and Mohammed Najah Mahdi. The use of swarms of unmanned aerial vehicles in mitigating area coverage challenges of forest-fire-extinguishing activities : A systematic literature review. *Forests*, 13(5), 2022.
- [12] Riham Altawy and Amr M. Youssef. Security, privacy, and safety aspects of civilian drones : A survey. *ACM Trans. Cyber-Phys. Syst.*, 1(2), November 2016.
- [13] Riham Altawy and Amr M. Youssef. Security, privacy, and safety aspects of civilian drones : A survey. *ACM Trans. Cyber-Phys. Syst.*, 1(2), nov 2016.
- [14] G. Andrienko, N. Andrienko, P. Jankowski, D. Keim, M.-J. Kraak, A. MacEachren, and S. Wrobel. Geovisual analytics for spatial decision support : Setting the research agenda. *International Journal of Geographical Information Science*, 21(8) :839–857, 2007.
- [15] Adnan Ashraf, Amin Majd, and Elena Troubitsyna. Towards a realtime, collision-free motion coordination and navigation system for a uav fleet. 2017.
- [16] Atmo Auvergne Rhones Alpes. Note bibliographique feux d’artifices et qualité de l’air, 2019.
https://www.atmo-auvergnerhonealpes.fr/sites/aura/files/content/migrated/atoms/files/note-bibliographique_feux-artifices_atmoaura_fevrier2019.pdf.
- [17] Rémi Bachelet. Méthode de résolution de problèmes : Qqoqcp, 2012.
http://rb.ec-lille.fr/1/Qualite/Qualite_QQOQCCP.pdf.
- [18] Clint R. Balog, Brent A. Terwilliger, Dennis A. Vincenzi, and David Carl Ison. Examining Human Factors Challenges of Sustainable Small Unmanned Aircraft System (sUAS) Operations. In Savage-Knepshield P. and Chen J., editors, *Advances in Human Factors in Robots and Unmanned Systems*. Springer, 2017.
- [19] Cristina Barrado, Mario Boyero, Luigi Brucculeri, Giancarlo Ferrara, Andrew Hately, Peter Hullah, David Martin-Marrero, Enric Pastor, Anthony Peter Rushton, and Andreas Volkert. U-space concept of operations : A key enabler for opening airspace to emerging low-altitude operations. *Aerospace*, 7(3), 2020.
- [20] Jose de Sousa Barros, Thyago Oliveira Freitas, Vivek Nigam, and Alisson V. Brito. Analysis of design strategies for unmanned aerial vehicles using co-simulation. *DESIGN AUTOMATION FOR EMBEDDED SYSTEMS*, 21(3-4, SI) :157–172, DEC 2017.

- [21] Siddappaji Basavaraju, V Ashok Rangan, and S Rajgopal. Unmanned aerial system (uas) hazard identification, reliability, risk analysis & range safety. In *2019 International Conference on Range Technology (ICORT)*, pages 1–5, 2019.
- [22] Eleonora Bassi. From here to 2023 : Civil drones operations and the setting of new legal rules for the european single sky. *JOURNAL OF INTELLIGENT & ROBOTIC SYSTEMS*, 2020.
- [23] Christian Bastien and Dominique Scapin. Ergonomic criteria for the evaluation of human-computer interfaces. Technical Report RT-0156, INRIA, June 1993.
- [24] Derick Moreira Baum, Euclides Carlos Pinto Neto, Jorge Rady De Almeida, Joao Batista Camargo, and Paulo Sergio Cugnasca. A mindset-based evolution of unmanned aircraft system (uas) acceptance into the national airspace system (nas). *IEEE ACCESS*, 8 :30938–30952, 2020.
- [25] Mehmet Aydin Baytas, Damla Çay, Yuchong Zhang, Mohammad Obaid, Asim Evren Yantaç, and Morten Fjeld. The design of social drones : A review of studies on autonomous flyers in inhabited environments. In *Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '19, page 1–13, New York, NY, USA, 2019. Association for Computing Machinery.
- [26] Amir Behjat, Steve Paul, and Souma Chowdhury. Learning reciprocal actions for cooperative collision avoidance in quadrotor unmanned aerial vehicles. *ROBOTICS AND AUTONOMOUS SYSTEMS*, 121, NOV 2019.
- [27] Christine M. Belcastro, Richard L. Newman, Joni Evans, David H. Klyde, Lawrence C. Barr, and Ersin Ancel. *Hazards Identification and Analysis for Unmanned Aircraft System Operations*.
- [28] Fethi Belkhouche. Reactive optimal uav motion planning in a dynamic world. *Robot. Auton. Syst.*, 96(C) :114–123, oct 2017.
- [29] Juan Besada, Ivan Campaña, Luca Bergesio, Ana Bernardos, and Gonzalo de Miguel. Drone flight planning for safe urban operations. *Personal and Ubiquitous Computing*, pages 1–20, 2020.
- [30] Juan A Besada, Luca Bergesio, Iván Campaña, Diego Vaquero-Melchor, Jaime López-Araquistain, Ana M Bernardos, and Jose R Casar. Drone mission definition and implementation for automated infrastructure inspection using airborne sensors. *Sensors*, 18(4) :1170, 2018.
- [31] Juan A. Besada, Ana M. Bernardos, Luca Bergesio, Diego Vaquero, Iván Campaña, and José R. Casar. Drones-as-a-service : A management architecture to provide mission planning, resource brokerage and operation support for fleets of drones. In *2019 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops (PerCom Workshops)*, pages 931–936, 2019.
- [32] Juan A Besada, Iván Campaña, Luca Bergesio, Ana M. Bernardos, and Gonzalo de Miguel. Drone flight planning for safe urban operations : Utm

- requirements and tools. In *2019 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops (PerCom Workshops)*, pages 924–930, 2019.
- [33] Jean-Marc Besse. Cartographie et pensée visuelle : réflexions sur la schématisation graphique. Exposé présenté lors de la Journée d'étude "La carte, outil de l'expertise aux XVIIIe et XIXe siècles", organisée par Isabelle Laboulais dans le cadre du programme "Expériences de terrain et compétences cartographiques" (Maison Interuniversitaire des Sciences de l'homme – Alsace / Agence Nationale de la Recherche) Strasbourg – 9 juin 2006, June 2006.
- [34] Michael A. R. Biggs and Daniela Büchler. Rigor and practice-based research. *Design Issues*, 23(3) :62–69, 2007.
- [35] Zachary Birnbaum, Andrey Dolgikh, Victor Skormin, Edward O'Brien, Daniel Muller, and Christina Stracquodaine. Unmanned aerial vehicle security using recursive parameter estimation. *JOURNAL OF INTELLIGENT & ROBOTIC SYSTEMS*, 84(1-4, SI) :107–120, DEC 2016.
- [36] Mark Blanks. UAS Applications. In Richard K. Barnhardt, Stephen B. Hottman, Douglas M. Marshall, and Eric Shappee, editors, *Introduction to Unmanned Aircraft Systems - Second Edition*, chapter 2. Taylor and Francis, 2014.
- [37] Juan A. Bonache-Seco, José A. Lopez-Orozco, Eva Besada-Portas, and José L. Risco-Martín. Art-gcs : An adaptive real-time multi-agent ground control station. 2019.
- [38] Thierry Bontems. Process management - "From theory to practice". In Montpellier [France] : CIHEAM-IAMM, editor, *9ème Ecole Inter-organismes "Qualité en Recherche et en Enseignement Supérieur"*, 2011/09/7-9, Montpellier (France), number 2 in Les cahiers de l'école qualité en recherche et en enseignement supérieur, page 155, Montpellier, France, September 2011. QUARES.
- [39] Hana Bouafif, Faouzi Kamoun, and Farkhund Iqbal. Towards a better understanding of drone forensics : A case study of parrot ar drone 2.0. *INTERNATIONAL JOURNAL OF DIGITAL CRIME AND FORENSICS*, 12(1) :35–57, JAN-MAR 2020.
- [40] Mark Bowkett, Kary Thanapalan, and Ewen Constant. Failure detection of composites with control system corrective response in drone system applications. *COMPUTERS*, 7(2), JUN 2018.
- [41] Joshua Brungardt and Richard K. Barnhardt. The "System" in UAS. In Richard K. Barnhardt, Stephen B. Hottman, Douglas M. Marshall, and Eric Shappee, editors, *Introduction to Unmanned Aircraft Systems - Second Edition*, chapter 3. Taylor and Francis, 2014.
- [42] Marcellin Buisson, Alexandre Bustico, Stéphane Chatty, Francois-Régis Colin, Yannick Jestin, Sébastien Maury, Christophe Mertz, and Philippe Truillet. Ivy : un bus logiciel au service du développement de prototypes

- de systèmes interactifs. In *IHM 2002, 14ème Conférence Francophone sur l'Interaction Homme-Machine*, pages pp 223–226, Poitiers, France, November 2002.
- [43] Eugen Valentin Butilă and Răzvan Gabriel Boboc. Urban traffic monitoring and analysis using unmanned aerial vehicles (uavs) : A systematic literature review. *Remote Sensing*, 14(3), 2022.
 - [44] Ivan Campaña, Luca Bergesio, Juan Alberto Besada Portas, and Gonzalo de Miguel. Air tracking and monitoring for unmanned aircraft traffic management. In *2019 Integrated Communications, Navigation and Surveillance Conference (ICNS)*, pages 1–9, 2019.
 - [45] Carlos Capitán, Jesus Capitan, Ángel Rodríguez Castaño, and Anibal Ollero. Risk assessment based on sora methodology for a uas media production application. In *2019 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, pages 451–459, New York, NY, USA, 06 2019. IEEE.
 - [46] Carlos Capitán, Jesus Capitán, Ángel Castaño, and Anibal Ollero. Risk assessment based on sora methodology for a uas media production application. In *2019 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, pages 451–459, 2019.
 - [47] Dominique Cardon, Jean-Philippe Cointet, and Antoine Mazières. Neurons spike back. *Réseaux*, 211(5) :173–220, 2018.
 - [48] David Carramiñana, Iván Campaña, Luca Bergesio, Ana M Bernardos, and Juan A Besada. Sensors and communication simulation for unmanned traffic management. *Sensors*, 21(3) :927, 2021.
 - [49] Giovanna Castellano, Ciro Castiello, Corrado Mencar, and Gennaro Vesio. Crowd detection in aerial images using spatial graphs and fully-convolutional neural networks. *IEEE ACCESS*, 8 :64534–64544, 2020.
 - [50] Joint Air Power Competence Centre. *Strategic Concept of Employment : For Unmanned Aircraft Systems in NATO*. Joint Air Power Competence Centre, 2010.
 - [51] Joel Chan, Steven Dang, and Steven P. Dow. Improving crowd innovation with expert facilitation. In *Proceedings of the 19th ACM Conference on Computer-Supported Cooperative Work & Social Computing, CSCW '16*, page 1223–1235, New York, NY, USA, 2016. Association for Computing Machinery.
 - [52] Che-Cheng Chang, Jichiang Tsai, Peng-Chen Lu, and Chuan-An Lai. Accuracy Improvement of Autonomous Straight Take-off Flying Forward, and Landing of a Drone with Deep Reinforcement Learning. *INTERNATIONAL JOURNAL OF COMPUTATIONAL INTELLIGENCE SYSTEMS*, 13(1) :914–919, 2020.
 - [53] Maria Mikela Chatzimichailidou, Nektarios Karanikas, and Anastasios Plioutsias. Application of stpa on small drone operations : a benchmarking approach. *Procedia Engineering*, 179 :13–22, 2017.

- [54] Yuqing Chen, Gaoxiang Zhang, Yan Zhuang, and Huosheng Hu. Autonomous flight control for multi-rotor uavs flying at low altitude. *IEEE ACCESS*, 7 :42614–42625, 2019.
- [55] Jung Hee Cheon, Kyoohyung Han, Seong-Min Hong, Hyoun Jin Kim, Junsoo Kim, Suseong Kim, Hosung Seo, Hyungbo Shim, and Yongsoo Song. Toward a secure drone system : Flying with real-time homomorphic authenticated encryption. *IEEE ACCESS*, 6 :24325–24339, 2018.
- [56] Clearance. Préparation de missions drone et demandes d'autorisation - clearance.
<https://clearance.aero/>, 2017. Accessed : 2021-10-22.
- [57] Jane Cleland-Huang, Michael Vierhauser, and Sean Bayley. Dronology : An incubator for cyber-physical system research. *arXiv preprint arXiv :1804.02423*, 2018.
- [58] Reece Clothier and Rodney Walker. *The Safety Risk Management of Unmanned Aircraft Systems*. 01 2014.
- [59] Commission de l'Union Européenne. Règlement d'exécution (ue) 2019/947 de la commission du 24 mai 2019 concernant les règles et procédures applicables à l'exploitation d'aéronefs sans équipage à bord, 2019.
https://eur-lex.europa.eu/eli/reg_del/2019/947/oj?locale=fr.
- [60] Commission de l'Union Européenne. Règlement délégué (ue) 2019/945 de la commission du 12 mars 2019 relatif aux systèmes d'aéronefs sans équipage à bord et aux exploitants, issus de pays tiers, de systèmes d'aéronefs sans équipage à bord, 2019.
https://eur-lex.europa.eu/eli/reg_del/2019/945/oj?locale=fr.
- [61] Commission de l'Union Européenne. Règlement d'exécution 2021/664 de la commission du 22 avril 2021 relatif à un cadre réglementaire pour l'u-space, 2021.
<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/PDF/?uri=CELEX:32021R0664>.
- [62] Federico Corrado, Gianluca Corrado, Edoardo Filippone, and Leopoldo Verde. A multi-intruder robust collision avoidance system for integration of unmanned vehicles in civil transport. page 2338–2343, 2019.
- [63] Frank Crawley. *A guide to hazard identification methods*. Elsevier, 2020.
- [64] Alan Cullen, Bill Williams, Elisa Bertino, Saritha Arunkumar, Erisa Karafili, and Emil Lupu. Mission support for drones : A policy based approach. page 7–12, 2017.
- [65] Jesimar da Silva Arantes, Márcio da Silva Arantes, Claudio Fabiano Motta Toledo, Onofre Trindade Júnior, and Brian C. Williams. An embedded system architecture based on genetic algorithms for mission and safety planning with uav. page 1049–1056, 2017.
- [66] Konstantinos Dalamagkidis, Kimon P. Valavanis, and Les. A. Piegls, editors. *UAS Safety Assessment and Functional Requirements*, pages 63–108. Springer Netherlands, Dordrecht, 2009.

- [67] Egidio D’Amato, Massimiliano Mattei, and Immacolata Notaro. Distributed reactive model predictive control for collision avoidance of unmanned aerial vehicles in civil airspace. *JOURNAL OF INTELLIGENT & ROBOTIC SYSTEMS*, 97(1) :185–203, JAN 2020.
- [68] Françoise Darses and Maurice de Montmollin. *L’ergonomie*. La Découverte, August 2012.
- [69] Lee Davies, Robert Cameron Bolam, Yuriy Vagapov, and Alecksey Anuchin. Review of unmanned aircraft system technologies to enable beyond visual line of sight (bvlos) operations. In *2018 X International Conference on Electrical Power Drive Systems (ICEPDS)*, pages 1–6, 2018.
- [70] Joao Luiz de Castro Fortes, Rafael Fraga, and Kenny Martin. An approach for safety assessment in uas operations applying stochastic fast-time simulation with parameter variation. page 1860–1871, 2016.
- [71] Ministère de la Transition Ecologique République Française. Alphetango. <https://alphetango.aviation-civile.gouv.fr/login.jsp>, 2017. Accessed : 2021-10-22.
- [72] Ewen Denney and Ganesh Pai. Automating the assembly of aviation safety cases. *IEEE TRANSACTIONS ON RELIABILITY*, 63(4) :830–849, DEC 2014.
- [73] Ewen Denney and Ganesh Pai. Tool support for assurance case development. *AUTOMATED SOFTWARE ENGINEERING*, 25(3) :435–499, SEP 2018.
- [74] Ewen Denney, Ganesh Pai, and Marcus Johnson. Towards a rigorous basis for specific operations risk assessment of uas. In *2018 IEEE/AIAA 37th Digital Avionics Systems Conference (DASC)*, pages 1–10, 2018.
- [75] Ewen Denney, Ganesh Pai, and Iain Whiteside. Model-driven development of safety architectures. page 156–166, 2017.
- [76] Alan Dennis and Traci Carte. Using geographical information systems for decision making : Extending cognitive fit theory to map-based presentations. *Information Systems Research*, 9 :194–203, 06 1998.
- [77] Carmelo Di Franco and Giorgio Buttazzo. Coverage path planning for uavs photogrammetry with energy and resolution constraints. *JOURNAL OF INTELLIGENT & ROBOTIC SYSTEMS*, 83(3-4, SI) :445–462, SEP 2016.
- [78] Vittorio Di Vito and Giulia Torrano. Rpas automatic ads-b based separation assurance and collision avoidance system real-time simulation results. *Drones*, 4(4) :73, 2020.
- [79] David DiBiase. Visualization in the earth sciences.
- [80] Kay Dickersin and Tianjin Li. Introduction to systematic reviews and meta-analysis, 2019. <https://www.coursera.org/learn/systematic-review/lecture/eCyR3/lecture-1a-introduction-to-systematic-reviews>.

- [81] Gabriel Dietzsch and Rafaela Araújo Jordão Rigaud Peixoto. The state-of-the-art of aeronautical cartography in brazil. *Revista Brasileira de Cartografia*, 5(67/5), 2015.
- [82] Laboratoire d’Innovation Pédagogique sur l’Europe. *La facilitation graphique*. 2020.
- [83] Direction Générale de l’Aviation Civile. Guide des aéronefs circulant sans personnes à bord : Activités particulières. Periodic Reports, 2018.
- [84] A. Dix. *Computer Supported Cooperative Work : A Framework*, pages 9–26. Springer London, London, 1994.
- [85] Air Space Drone. Flyby by asd.
<https://flyby.aero/>, 2021. Accessed : 2021-10-22.
- [86] Yanshuang Du, Xuejun Zhang, and Qi Gu. Adaptive separation thresholds for self-separation of unmanned aircraft system in dynamic airspace. *IEEE ACCESS*, 7 :141817–141825, 2019.
- [87] Yanshuang Du, Xuejun Zhang, and Zunli Nie. A real-time collision avoidance strategy in dynamic airspace based on dynamic artificial potential field algorithm. *IEEE ACCESS*, 7 :169469–169479, 2019.
- [88] Chaofan Duan, Jing Feng, and Haotian Chang. Meteorology-aware path planning for the uav based on the improved intelligent water drops algorithm. *IEEE Access*, 9 :49844–49856, 2021.
- [89] Chaofan Duan, Jing Feng, and Haotian Chang. Meteorology-Aware Path Planning for the UAV Based on the Improved Intelligent Water Drops Algorithm. *IEEE ACCESS*, 9 :49844–49856, 2021.
- [90] Clarence A. Ellis, Simon J. Gibbs, and Gail Rein. Groupware : Some issues and experiences. *Commun. ACM*, 34(1) :39–58, January 1991.
- [91] Douglas C Engelbart. Augmenting human intellect : A conceptual framework. Technical report, Defense Technical Information Center, 1962.
- [92] Ergo Motri Santé. La différence entre travail prescrit et travail réel, 2021. <https://ergo-motri-sante.fr/2021/02/16/la-difference-entre-travail-prescrit-et-travail-reel/>.
- [93] EUROCONTROL. Review of techniques to support the eatmp safety assessment methodology, 2014.
https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/library/001b_Techniques_to_Support_EATMP_SAM.pdf.
- [94] European Aviation Safety Agency. Uas safety risk portfolio and analysis, 2016. <https://www.easa.europa.eu/downloads/21489/en>.
- [95] European Cockpit Association. Specific operations risk assessment (sora), 2019. <https://www.eurocockpit.be/positions-publications/specific-operations-risk-assessment-sora>.
- [96] European Union Aviation Safety Agency. Annex I to ED Decision 2019/021/R - Acceptable Means of Compliance (AMC) and Guidance Material (GM) to Commission Implementing Regulation (EU)

- 2019/947, 2019. <https://www.easa.europa.eu/document-library/agency-decisions/ed-decision-2019021r>.
- [97] Fact.MR. Europe drone market outlook (2022-2032), 2022. <https://www.factmr.com/report/europe-drones-market>.
- [98] Baoan Fan and Guigen Zeng. Obstacle avoidance system design based on quad - rotor uav. In *Proceedings of the 2019 4th International Conference on Robotics, Control and Automation, ICRCA 2019*, page 144–147, New York, NY, USA, 2019. Association for Computing Machinery.
- [99] Allison Ferguson. Opening the skies to beyond visual line of sight drone operations. Report, 2018. <https://www.precisionhawk.com/beyond-visual-line-of-sight-bvlos-drone-operations>.
- [100] Alain Findeli. La recherche-projet : une méthode pour la recherche en design. In *Texte de la communication présentée au premier Symposium de recherche sur le design à HGK de Bâle sous les auspices du Swiss Design Network, Bâle*, 2004.
- [101] Michael Finke, Malte-Levin Jauer, and Kathleen Muth. Deriving support functions for radar approach controllers confronted with mixed manned and unmanned air traffic. In *Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress 2018*, 2018.
- [102] John C Flanagan. The critical incident technique. *Psychological bulletin*, 51(4) :327, 1954.
- [103] Joint Authorities for Rulemaking on Unmanned Aircraft Systems. Jarus - who we are and what we do, september 2018. http://jarus-rpas.org/sites/jarus-rpas.org/files/storage/Library-Documents/jarus_who_we_are_what_we_do_v_8_0_210918.pdf.
- [104] Joint Authorities for Rulemaking on Unmanned Aircraft Systems. Jar doc 06 sora (package), march 2019. <http://jarus-rpas.org/content/jar-doc-06-sora-package>.
- [105] Fortune Business Insight. Commercial drone market, 2022. <https://www.fortunebusinessinsights.com/commercial-drone-market-102171>.
- [106] Max Friedrich and Mark Vollrath. Human machine interface design for monitoring safety risks associated with operating small unmanned aircraft systems in urban areas. *Aerospace*, 8(3) :71, 2021.
- [107] Qixi Fu, Xiaolong Liang, Jiaqiang Zhang, Duo Qi, and Xiujun Zhang. Design and experiment of autonomous flight uas geofence algorithm. In *Proceedings of the 2nd International Conference on Computer Science and Software Engineering, CSSE 2019*, page 137–143, New York, NY, USA, 2019. Association for Computing Machinery.
- [108] Zhangjie Fu, Yuanhang Mao, Daojing He, Jingnan Yu, and Guowu Xie. Secure multi-uav collaborative task allocation. *IEEE ACCESS*, 7 :35579–35587, 2019.

- [109] Philippe Fuchs. *Le Traité de la réalité virtuelle, deuxième édition,, deuxième édition, 2 volumes*. Les Presses de l'Ecole des Mines de Paris, September 2003.
- [110] Fédération Française Aéronautique. Combien ça coûte ?, 2022. https://www.ffa-aero.fr/FR/frm_Decouvrir_Cout.awp.
- [111] Jeremi Gancet, Gautier Hattenberger, Rachid Alami, and Simon Lacroix. Task planning and control for a multi-uav system : Architecture and algorithms. pages 1017 – 1022, 09 2005.
- [112] Jérémie Garcia, Anke Brock, Nicolas Saporito, Gautier Hattenberger, Xavier Paris, Michel Gorraz, and Yannick Jestin. Designing human-drone interactions with the Paparazzi UAV System. In *1st International Workshop on Human-Drone Interaction*, Glasgow, United Kingdom, May 2019. Ecole Nationale de l'Aviation Civile [ENAC].
- [113] Jose Antonio Garcia-Pulido, Gonzalo Pajares, Sebastian Dormido, and Jesus Manuel de la Cruz. Recognition of a landing platform for unmanned aerial vehicles by using computer vision-based techniques. *EXPERT SYSTEMS WITH APPLICATIONS*, 76 :152–165, JUN 15 2017.
- [114] Gautier Hattenberger. Paparazzi uav blog, 2021. <https://blog.paparazziuav.org/>.
- [115] Bill Gaver, Tony Dunne, and Elena Pacenti. Design : cultural probes. *interactions*, 6(1) :21–29, 1999.
- [116] Ricardo A. V. Gimenes, Lucio F. Vismari, Valter F. Avelino, Joao B. Camargo, Jr., Jorge R. de Almeida, Jr., and Paulo S. Cugnasca. Guidelines for the integration of autonomous uas into the global atm. *JOURNAL OF INTELLIGENT & ROBOTIC SYSTEMS*, 74(1-2, SI) :465–478, APR 2014.
- [117] Michael Glossop, Agamemnon Loannides, and John Gould. *Review of hazard identification techniques*. Health & Safety Laboratory, 2000.
- [118] Danny Godin and Mithra Zahedi. Aspects of research through design : a literature review. 2014.
- [119] Nishanth R Goli and Brian Landrum. Development of an integrated uas for agricultural imaging applications. In *15th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations Conference*, page 3286, 2015.
- [120] Sergio Alejandro Gómez, Anca Goron, Adrian Groza, and Ioan Alfred Letia. Assuring safety in air traffic control systems with argumentation and model checking. *Expert Syst. Appl.*, 44(C) :367–385, feb 2016.
- [121] Veronica Gonzalez, Concepcion A. Monje, Luis Moreno, and Carlos Balaguer. Uavs mission planning with flight level constraint using fast marching square method. *ROBOTICS AND AUTONOMOUS SYSTEMS*, 94 :162–171, AUG 2017.
- [122] Mikhail Gorobetz, Leonids Ribickis, Anatoly Levchenkov, and Anna Beinarovica. Machine learning algorithm of immune neuro-fuzzy anti-collision embedded system for autonomous unmanned aerial vehicles team. 2019.

- [123] Joan Greenbaum. A design of one's own : Towards participatory design in the us. *DAIMI Report Series*, 20, 12 1991.
- [124] European Commission Drone Leader's Group. A drone strategy 2.0 for a smart and sustainable unmanned aircraft eco-system in europe, 2022.
- [125] Greg Guest, Arwen Bunce, and Laura Johnson. How many interviews are enough ? : An experiment with data saturation and variability. *Field Methods*, 18(1) :59–82, 2006.
- [126] Dingfei Guo, Maiying Zhong, Hongquan Ji, Yang Liu, and Rui Yang. A hybrid feature model and deep learning based fault diagnosis for unmanned aerial vehicle sensors. *NEUROCOMPUTING*, 319 :155–163, NOV 30 2018.
- [127] Rongxiao Guo, Buhong Wang, and Jiang Weng. Vulnerabilities and attacks of uav cyber physical systems. In *Proceedings of the 2020 International Conference on Computing, Networks and Internet of Things*, CNIOT2020, page 8–12, New York, NY, USA, 2020. Association for Computing Machinery.
- [128] Michael Gusenbauer and Neal Haddaway. Which academic search systems are suitable for systematic reviews or meta-analyses ? evaluating retrieval qualities of google scholar, pubmed and 26 other resources [open access]. *Research Synthesis Methods*, 11 :181–217, 03 2020.
- [129] Muki Haklay, Sofia Basiouka, Vyron Antoniou, and Aamer Ather. How many volunteers does it take to map an area well? the validity of linus' law to volunteered geographic information. *Cartographic Journal The*, 47 :315–322, 11 2010.
- [130] Kelly Hayhurst, Jeffrey Maddalon, Paul Miner, George Szatkowski, Michael Ulrey, Michael Dewalt, Cary Avionicon, and Williamsburg Virginia. Preliminary considerations for classifying hazards of unmanned aircraft systems. 01 2007.
- [131] Daojing He, Hong Liu, Sammy Chan, and Mohsen Guizani. How to govern the non-cooperative amateur drones ? *IEEE NETWORK*, 33(3) :184–189, MAY-JUN 2019.
- [132] Florence Ho, Ruben Geraldles, Artur Goncalves, Marc Cavazza, and Helmut Prendinger. Simulating shared airspace for service uavs with conflict resolution. page 2192–2194, 2018.
- [133] Alan Hobbs and Beth Lyall. Human factors guidelines for unmanned aircraft systems. *Ergonomics in Design*, 24(3) :23–28, 2016.
- [134] Marius Hogräfer, Magnus Heitzler, and Hans-Jörg Schulz. The state of the art in map-like visualization. In *Computer Graphics Forum*, volume 39, pages 647–674. Wiley Online Library, 2020.
- [135] Jie Huang, Guoqing Tian, Jiancheng Zhang, and Yutao Chen. On unmanned aerial vehicles light show systems : Algorithms, software and hardware. *Applied Sciences*, 11(16), 2021.

- [136] Hilary Hutchinson, Wendy Mackay, Bo Westerlund, Benjamin B Beder-son, Allison Druin, Catherine Plaisant, Michel Beaudouin-Lafon, Stéphane Conversy, Helen Evans, Heiko Hansen, et al. Technology probes : inspiring design for and with families. In *Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems*, pages 17–24, 2003.
- [137] ICAO. *Unmanned Aircraft Systems (UAS) - Circular 328 - AN/190*. International Civil Aviation Organization, 2011.
- [138] ICAO. *Annex 15 - Aeronautical Information Services*. International Civil Aviation Organization, 2015.
- [139] ICAO. *Manual on Remotely Piloted Aircraft Systems (RPAS) - Doc 10039 - AN/507*. International Civil Aviation Organization, 2015.
- [140] ICAO. *Annex 19 - Safety Management*. International Civil Aviation Organization, 2016.
- [141] ICAO. *Document 8697- Aeronautical Chart Manual*. International Civil Aviation Organization, 2016.
- [142] ICAO. *Document 9859 - Safety Management Manual*. International Civil Aviation Organization, 2018.
- [143] ICAO. *Document 10004 - Global Aviation Safety Plan*. International Civil Aviation Organization, 2020.
- [144] Innov’ATM. Dronekeeper : préparation de mission pour télépilotes et données drone. <https://www.dronekeeper.com/>, 2021. Accessed : 2021-10-22.
- [145] Innov’ATM. U-spacekeeper | u-space keeper. <https://france.uspacekeeper.com/>, 2021. Accessed : 2021-10-22.
- [146] Javier Irizarry and Eric N Johnson. Feasibility study to determine the economic and operational benefits of utilizing unmanned aerial vehicles (uavs). Technical report, Georgia Institute of Technology, 2014.
- [147] ISO. Iso 9241-11 :2018(fr). 2018.
- [148] Management du risque — Lignes directrices. Standard, International Organization for Standardization, Geneva, CH, February 2018.
- [149] EuroUSC Italia. Samwise : online risk assessment for drone operations. <https://www.online-sora.com/>, 2019. Accessed : 2021-10-22.
- [150] EuroUSC Italia. Samwise : online risk assessment for drone operations. <https://www.online-sora.com/>, 2019. Accessed : 2021-10-22.
- [151] Paweł Janik, Maciej Zawistowski, Radosław Fellner, and Grzegorz Zawistowski. Unmanned aircraft systems risk assessment based on sora for first responders and disaster management. *Applied Sciences*, 11(12), 2021.
- [152] Ankur Joshi, Saket Kale, Satish Chandel, and D Kumar Pal. Likert scale : Explored and explained. *British journal of applied science & technology*, 7(4) :396, 2015.

- [153] Uluhan C. Kaya, Atilla Dogan, and Manfred Huber. A utility-based path planning for safe uas operations with a task-level decision-making capability. page 1227–1233, 2019.
- [154] Do-Yup Kim and Jang-Won Lee. Joint mission assignment and topology management in the mission-critical fanet. *IEEE INTERNET OF THINGS JOURNAL*, 7(3) :2368–2385, MAR 2020.
- [155] Jiwon Kim, Yonghun Choi, Seunghyeok Jeon, Jaeyun Kang, and Ho-jung Cha. Optrone : Maximizing Performance and Energy Resources of Drone Batteries. *IEEE TRANSACTIONS ON COMPUTER-AIDED DESIGN OF INTEGRATED CIRCUITS AND SYSTEMS*, 39(11) :3931–3943, NOV 2020.
- [156] Trevor Kistan, Alessandro Gardi, and Roberto Sabatini. Machine learning and cognitive ergonomics in air traffic management : Recent developments and considerations for certification. *Aerospace, Application of Multiagent Systems and Artificial Intelligence Techniques in Aviation*, 2018.
- [157] Erica Kleinman, Nikitha Preetham, Zhaoqing Teng, Andy Bryant, and Magy Seif El-Nasr. "what happened here!?" a taxonomy for user interaction with spatio-temporal game data visualization. *Proc. ACM Hum.-Comput. Interact.*, 5(CHI PLAY), oct 2021.
- [158] Lian Koh and Serge Wich. Dawn of drone ecology : Low-cost autonomous aerial vehicles for conservation. *Tropical Conservation Science*, 5 :121–132, 06 2012.
- [159] Parimal Kopardekar, Joseph Rios, Thomas Prevot, Marcus Johnson, Jae-woo Jung, and John E. Robinson III. Unmanned Aircraft System Traffic Management (UTM) Concept of Operations. *AIAA Aviation*, 16th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations Conference, june 2016.
- [160] John Krygier and Denis Wood. *Making Maps : A Visual Guide to Map Design for GIS, 3rd Edition*. 01 2016.
- [161] Anders la Cour-Harbo. Quantifying risk of ground impact fatalities for small unmanned aircraft. *JOURNAL OF INTELLIGENT & ROBOTIC SYSTEMS*, 93(1-2, 2, SI) :367–384, FEB 2019.
- [162] Carine Lallemand. *Méthodes de Design UX. 30 méthodes fondamentales pour concevoir des expériences optimales. (2e édition)*. 09 2018.
- [163] Zachary P. Languell and Qijun Gu. A Multi-Point Distance-Bounding Protocol for Securing Automatic Dependent Surveillance-Broadcast in Unmanned Aerial Vehicle Applications. *JOURNAL OF COMPUTER SCIENCE AND TECHNOLOGY*, 35(4, SI) :825–842, JUL 2020.
- [164] Jill H. Larkin and Herbert A. Simon. Why a diagram is (sometimes) worth ten thousand words. *Cognitive Science*, 11(1) :65–100, 1987.
- [165] Larousse. Larousse - dictionnaire de français, 2022. <https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais-monolingue>.

- [166] Patrick Le Blaye and Claude Le Tallec. Low level traffic monitoring : RPAS concept of operation and development of a ground based system. In *ICAS 2018*, BELO HORIZONTE, Brazil, September 2018.
- [167] Magalie Le Gall. La pensée visuelle. *I2D – Information, données & documents*, 54(1) :44–45, March 2017.
- [168] Claude Le Tallec and Patrick Le Blaye. Low level rpas traffic identification and management. In *8th European Conference for Aeronautics and Space Sciences EUCASS*, july 2017.
- [169] Sang Eon Lee, Jae-Wook Jung, Youngjun Choi, Yoon-Jin Yoon, and Jung-Wuk Hong. Unmanned aerial vehicle impacts on heat-strengthened glass. *IEEE ACCESS*, 7 :104269–104278, 2019.
- [170] Sedov Leonid, Valentin Polishchuk, Maury Thibault, Ulloa Maria, and Lykova Darya. Qualitative and quantitative risk assessment of urban airspace operations. In *SESAR Innovation Days (SID 2021)*, 2021.
- [171] Shidong Li, Huihua Zhou, Jia Hu, Qing Ai, and Chao Cai. A fast path planning approach for unmanned aerial vehicles. *CONCURRENCY AND COMPUTATION-PRACTICE & EXPERIENCE*, 27(13, SI) :3446–3460, SEP 10 2015.
- [172] Yu Li, Muhammad Monjurul Karim, and Ruwen Qin. A virtual-reality-based training and assessment system for bridge inspectors with an assistant drone. *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*, 52(4) :591–601, 2022.
- [173] Yixiang Lim, Alessandro Gardi, Roberto Sabatini, Subramanian Ramasamy, and Trevor Kistan. Avionics human-machine interfaces and interactions for manned and unmanned aircraft. *Progress in Aerospace Science*, 102, 2018.
- [174] Yixiang Lim, Nichakorn Pongsarkornsathien, Alessandro Gardi, Roberto Sabatini, Trevor Kistan, Neta Ezer, and Daniel J Bursch. Adaptive human-robot interactions for multiple unmanned aerial vehicles. *Robotics*, 10(1) :12, 2021.
- [175] Yixiang Lim, Subramanian Ramasamy, Alessandro Gardi, Trevor Kistan, and Roberto Sabatini. Cognitive human-machine interfaces and interactions for unmanned aircraft. *Journal of Intelligent Robot Systems*, 91, 2018.
- [176] Chin E. Lin and Ya-Hsien Lai. Quasi-ads-b based uav conflict detection and resolution to manned aircraft. *JOURNAL OF ELECTRICAL AND COMPUTER ENGINEERING*, 2015.
- [177] Alexandros Lioulemes, Georgios Galatas, Vangelis Metsis, Gian Luca Mariottini, and Fillia Makedon. Safety challenges in using ar.drone to collaborate with humans in indoor environments. In *Proceedings of the 7th International Conference on Pervasive Technologies Related to Assistive Environments, PETRA '14*, New York, NY, USA, 2014. Association for Computing Machinery.

- [178] Jia Liu, Xiaolin Qin, Baolian Qi, and Xiaoli Cui. 3d online path planning of uav based on improved differential evolution and model predictive control. *INTERNATIONAL JOURNAL OF INNOVATIVE COMPUTING INFORMATION AND CONTROL*, 16(1) :315–329, FEB 2020.
- [179] Barbara Livoreil and Amdouni Ludivine. La revue systématique, 01 2019.
- [180] Sara Ljungblad, Yemao Man, Mehmet Aydın Baytaş, Mafalda Gamboa, Mohammad Obaid, and Morten Fjeld. *What Matters in Professional Drone Pilots' Practice ? An Interview Study to Understand the Complexity of Their Work and Inform Human-Drone Interaction Research*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 2021.
- [181] Sara Ljungblad, Yemao Man, Mehmet Aydın Baytaş, Mafalda Gamboa, Mohammad Obaid, and Morten Fjeld. What matters in professional drone pilots' practice ? an interview study to understand the complexity of their work and inform human-drone interaction research. In *Proceedings of the 2021 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '21, New York, NY, USA, 2021. Association for Computing Machinery.
- [182] Gerald L. Lohse, Kevin Biolsi, Neff Walker, and Henry H. Rueter. A classification of visual representations. *Commun. ACM*, 37(12) :36–49, dec 1994.
- [183] Jonas Lundberg, Magnus Bång, Jimmy Johansson, Ali Cheaitou, Billy Josefsson, and Zain Tahboub. Human-in-the-loop ai : Requirements on future (unified) air traffic management systems. In *2019 IEEE/AIAA 38th Digital Avionics Systems Conference (DASC)*, pages 1–9, 2019.
- [184] Jonas Lundberg and Björn JE Johansson. A framework for describing interaction between human operators and autonomous, automated, and manual control systems. *Cognition, Technology & Work*, pages 1–21, 2020.
- [185] Alan Maceachren. *The Roles of Maps, from Some Truth with Maps : A Primer on Symbolization and Design*, pages 244–251. John Wiley and Sons, April 2011.
- [186] ALAN M. MACEACHREN. Chapter 1 - visualization in modern cartography : Setting the agenda. In ALAN M. MACEACHREN and D.R. FRASER TAYLOR, editors, *Visualization in Modern Cartography*, volume 2 of *Modern Cartography Series*, pages 1–12. Academic Press, 1994.
- [187] Wendy E. Mackay and Anne-Laure Fayard. Hci, natural science and design : A framework for triangulation across disciplines. In *Proceedings of the 2nd Conference on Designing Interactive Systems : Processes, Practices, Methods, and Techniques*, DIS '97, page 223–234, New York, NY, USA, 1997. Association for Computing Machinery.
- [188] Imen Mahjri, Amine Dhraief, Abdelfettah Belghith, and Ahmad S. Al-Mogren. Slide : A straight line conflict detection and alerting algorithm for multiple unmanned aerial vehicles. *IEEE TRANSACTIONS ON MOBILE COMPUTING*, 17(5) :1190–1203, MAY 1 2018.

- [189] Terrence Martin, Zi Feng Huang, and Aaron McFadyen. Airspace risk management for uavs a framework for optimising detector performance standards and airspace traffic using jarus sora. In *2018 IEEE/AIAA 37th Digital Avionics Systems Conference (DASC)*, pages 1516–1525, New York, NY, USA, 2018. IEEE.
- [190] G M Martinez-Toro, G C Ariza-Zabala, D W Rico Bautista, and E Romero-Riaño. Human computer interaction in transport, a systematic literature review. *Journal of Physics : Conference Series*, 1409(1) :012002, nov 2019.
- [191] Afra Mashhadi, Giovanni Quattrone, Licia Capra, and Peter Mooney. On the accuracy of urban crowd-sourcing for maintaining large-scale geospatial databases. In *Proceedings of the Eighth Annual International Symposium on Wikis and Open Collaboration*, WikiSym '12, New York, NY, USA, 2012. Association for Computing Machinery.
- [192] Thomas Mattauch. Innovate through crowd sourcing. In *Proceedings of the 41st Annual ACM SIGUCCS Conference on User Services*, SIGUCCS '13, page 39–42, New York, NY, USA, 2013. Association for Computing Machinery.
- [193] Jason S McCarley and Christopher D Wickens. Human factors implications of uavs in the national airspace. 2005.
- [194] Karl-Heinz Meine. Aviation cartography. *The Cartographic Journal*, 3(1) :31–40, 1966.
- [195] Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire. Drones - usages professionnels, 2020. <https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/drones-usages-professionnels>.
- [196] Minute Drone. Tarif des formations télépilote de drone, 2022. <https://minutedrone.com/formation/tarif-formation-telepilote-drone>.
- [197] Giovanni Miraglia and Loyd R. Hook. Geometric Verification of Vector Fields for Autonomous Aircraft Navigation. *IEEE ACCESS*, 9 :36294–36307, 2021.
- [198] David Moher, Alessandro Liberati, Jennifer Tetzlaff, and Douglas G. Altman. Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses : The PRISMA Statement. *Annals of Internal Medicine*, 151(4) :264–269, August 2009. Publisher : American College of Physicians.
- [199] Kevin Monk, R. Jay Shively, Lisa Fern, and R. Conrad Rorie. Effects of display location and information level on uas pilot assessments of a detect and avoid system. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 59(1) :50–54, 2015.
- [200] David Morgan. Focus groups. *Annual Review of Sociology*, 22 :129–152, 08 1996.
- [201] Sebti Mouelhi, Mohamed-Emine Laarouchi, Daniela Cancila, and Hakima Chaouchi. Predictive formal analysis of resilience in cyber-physical systems. *IEEE ACCESS*, 7 :33741–33758, 2019.

- [202] César A. Muñoz, Aaron Dutle, Anthony Narkawicz, and Jason Upchurch. Unmanned aircraft systems in the national airspace system : A formal methods perspective. *ACM SIGLOG News*, 3(3) :67–76, aug 2016.
- [203] N. Nagarani, P. Venkatakrishnan, and Narayanam Balaji. Unmanned aerial vehicles runway landing system with efficient target detection by using morphological fusion for military surveillance system. *COMPUTER COMMUNICATIONS*, 151 :463–472, FEB 1 2020.
- [204] Sreedevi Nair, Gloria Rodrigues, Cheryl Dsouza, Shirin Bellary, and Veliza Gonsalves. Designing of beach rescue drone using gps and zigbee technologies. In *2019 International Conference on Communication and Electronics Systems (ICCES)*, pages 1154–1158, 2019.
- [205] Fedja Netjasov and Milan Janic. A review of research on risk and safety modelling in civil aviation. *Journal of Air Transport Management*, 14(4) :213–220, 2008.
- [206] Jakob Nielsen and Rolf Molich. Heuristic evaluation of user interfaces. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '90, page 249–256, New York, NY, USA, 1990. Association for Computing Machinery.
- [207] Martin Nöllenburg. *Geographic Visualization*, pages 257–294. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2007.
- [208] Donald A. Norman. *The design of everyday things*. Basic Books, [New York], 2002.
- [209] Nouveau partenariat pour le développement de l’Afrique (NEPAD). Des drones à l’horizon - transformer l’agriculture en afrique, 2018. <https://www.fortunebusinessinsights.com/commercial-drone-market-102171>.
- [210] Joanna Orymowska and Paulina SOBKOWICZ. Hazard identification methods. *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport*, 95 :145–158, 06 2017.
- [211] Donatas Ovodas and Algimantas Česnulevičius. Semiotic evaluation of lithuania military air navigation charts. *Geodesy and Cartography*, 63(1), 2014.
- [212] Chaofeng Pan, Haotian Shan, Xianbin Cao, Xuelong Li, and Dapeng Wu. Leveraging spatial context disparity for power line detection. *COGNITIVE COMPUTATION*, 9(6) :766–779, DEC 2017.
- [213] Yushan Pan and Hans Petter Hildre. Holistic human safety in the design of marine operations safety. *Ocean Engineering*, 151 :378–389, 2018.
- [214] Jesse Rawlins Paterson, Jiwoong Han, Tom Cheng, Paxtan Huish Laker, David Livingston McPherson, Joseph Menke, and Allen Y Yang. Improving usability, efficiency, and safety of uav path planning through a virtual reality interface. In *Symposium on Spatial User Interaction*, SUI '19, New York, NY, USA, 2019. Association for Computing Machinery.

- [215] Timothy Patterson, Sally McClean, Philip Morrow, Gerard Parr, and Chunbo Luo. Timely autonomous identification of uav safe landing zones. *IMAGE AND VISION COMPUTING*, 32(9) :568–578, SEP 2014.
- [216] Joshua Peschel and Robin Murphy. On the human-machine interaction of unmanned aerial system mission specialists. *Human-Machine Systems, IEEE Transactions on*, 43 :53–62, 01 2013.
- [217] Emmanuel Pietriga, Pierre Cubaud, Joseph Schwarz, Romain Primet, Marcus Schilling, Denis Barkats, Emilio Barrios, and Baltasar Vila Vilario. Interaction design challenges and solutions for ALMA operations monitoring and control. In SPIE, editor, *SPIE Astronomical Telescopes and Instrumentation*, volume 8451 of *Proc. SPIE 8451, Software and Cyberinfrastructure for Astronomy II*, Amsterdam, Netherlands, July 2012. SPIE.
- [218] Lars J Planke, Yixiang Lim, Alessandro Gardi, Roberto Sabatini, Trevor Kistan, and Neta Ezer. A cyber-physical-human system for one-to-many uas operations : Cognitive load analysis. *Sensors*, 20(19) :5467, 2020.
- [219] Nichakorn Pongsakornsathien, Suraj Bijjahalli, Alessandro Gardi, Angus Symons, Yuting Xi, Roberto Sabatini, and Trevor Kistan. A performance-based airspace model for unmanned aircraft systems traffic management. *Aerospace*, 7(11) :154, 2020.
- [220] Nichakorn Pongsakornsathien, Alessandro Gardi, Roberto Sabatini, Trevor Kistan, and Neta Ezer. Human-machine interactions in very-low-level uas operations and traffic management. In *2020 AIAA/IEEE 39th Digital Avionics Systems Conference (DASC)*, pages 1–8. IEEE, 2020.
- [221] Stefano Primatesta, Alessandro Rizzo, and Anders la Cour-Harbo. Ground risk map for unmanned aircraft in urban environments. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 97(3-4) :489–509, may 2019.
- [222] Stefano Primatesta, Alessandro Rizzo, and Anders la Cour-Harbo. Ground risk map for unmanned aircraft in urban environments. *JOURNAL OF INTELLIGENT & ROBOTIC SYSTEMS*, 97(3-4) :489–509, MAR 2020.
- [223] Devdatt P Purohit, NA Siddiqui, Abhishek Nandan, and Bikarama P Yadav. Hazard identification and risk assessment in construction industry. *International Journal of Applied Engineering Research*, 13(10) :7639–7667, 2018.
- [224] Xin Qi, Juntong Qi, Didier Theilliol, Dalei Song, Youmin Zhang, and Jianda Han. Self-healing control design under actuator fault occurrence on single-rotor unmanned helicopters. *JOURNAL OF INTELLIGENT & ROBOTIC SYSTEMS*, 84(1-4, SI) :21–35, DEC 2016.
- [225] Xin Qin and Jyotirmoy V. Deshmukh. Preview of predictive monitoring for signal temporal logic with probabilistic guarantees. page 19–21, 2019.
- [226] Huaxin Qiu and Haibin Duan. A multi-objective pigeon-inspired optimization approach to uav distributed flocking among obstacles. *INFORMATION SCIENCES*, 509 :515–529, JAN 2020.

- [227] Nicolas Raballand, Sylvain Bertrand, Stéphanie Lala, and Baptiste Levasseur. DROSERA : A DRONE Simulation Environment for Risk Assessment. In *Proceedings of the 31st European Safety and Reliability Conference*, pages 354–361, Angers, France, September 2021. Research Publishing Services.
- [228] Balita Rakotonarivo, Nicolas Drougard, Stéphane Conversy, and Jérémie Garcia. Safety first ! an interview study of drone mission development to guide system design supporting safety analyse and authorization requests. In *33e Conférence Francophone sur l'Interaction Homme-Machine (IHM '22)*, Namur, Belgique, April 2022.
- [229] Balita H Rakotonarivo, Stéphane Conversy, Nicolas Drougard, and Jérémie Garcia. Revue Systématique de la Littérature sur le Soutien à la Sécurité des Opérations de Drones. In *32e Conférence Francophone sur l'Interaction Homme-Machine (IHM '20.21)*, Metz, France, April 2021.
- [230] Balita H Rakotonarivo, Stéphane Conversy, Nicolas Drougard, and Jérémie Garcia. Revue Systématique de la Littérature sur le Soutien à la Sécurité des Opérations de Drones. In *32e Conférence Francophone sur l'Interaction Homme-Machine (IHM '20.21)*, Metz, France, April 2021.
- [231] Subramanian Ramasamy, Roberto Sabatini, and Alessandro Gardi. A unified analytical framework for aircraft separation assurance and uas sense-and-avoid. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 91(3) :735–754, 2018.
- [232] Robert Bright. Pourquoi les drones sont idéaux pour préserver l'environnement, 2017.
https://www.huffingtonpost.fr/electrify-the-world/article/pourquoi-les-drones-sont-ideaux-pour-preserver-l-environnement_104454.html.
- [233] Mariana Rodrigues and Kalinka Regina Lucas Jaquie Castelo Branco. Cloud-sphere : Towards secure uav service provision. *JOURNAL OF INTELLIGENT & ROBOTIC SYSTEMS*, 97(1) :249–268, JAN 2020.
- [234] Victor Rodriguez-Fernandez, Hector D. Menendez, and David Camacho. A study on performance metrics and clustering methods for analyzing behavior in uav operations. *JOURNAL OF INTELLIGENT & FUZZY SYSTEMS*, 32(2) :1307–1319, 2017.
- [235] Robert Roth. Cartographic interaction primitives : Framework and synthesis. *Cartographic Journal The*, 49 :376–395, 11 2012.
- [236] Clayton D. Rothwell and Michael J. Patzek. An interface for verification and validation of unmanned systems mission planning : Communicating mission objectives and constraints. *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*, 49 :642–651, 2019.
- [237] Clayton D. Rothwell and Michael J. Patzek. An interface for verification and validation of unmanned systems mission planning : Communicating mission objectives and constraints. *IEEE TRANSACTIONS ON HUMAN-MACHINE SYSTEMS*, 49(6) :642–651, DEC 2019.

- [238] RTCA. Operational Services and Environmental Definition for Unmanned Aircraft Systems. Standard, Radio Technical Commission for Aeronautics, 2007.
- [239] José Rufino. Towards integration of adaptability and non-intrusive run-time verification in avionic systems. *SIGBED Rev.*, 13(1) :60–65, mar 2016.
- [240] Jose Ruiz-Jimenez, Nicola Zanca, Hangzhen Lan, Matti Jussila, Kari Hartonen, and Marja-Liisa Riekkola. Aerial drone as a carrier for miniaturized air sampling systems. *Journal of Chromatography A*, 1597 :202–208, 2019.
- [241] Davide Di Ruscio, Ivano Malavolta, Patrizio Pelliccione, and Massimo Tivoli. Automatic generation of detailed flight plans from high-level mission descriptions. page 45–55, 2016.
- [242] Mohammad Fattahi Sani, Maryam Shoaran, and Ghader Karimian. Automatic landing of a low-cost quadrotor using monocular vision and kalman filter in gps-denied environments. *TURKISH JOURNAL OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMPUTER SCIENCES*, 27(3) :1821–1838, 2019.
- [243] Jeff Sauro and Erika Kindlund. A method to standardize usability metrics into a single score. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '05, page 401–409, New York, NY, USA, 2005. Association for Computing Machinery.
- [244] Oscar Bowen Schofield, Kasper Høj Lorenzen, and Emad Ebeid. Cloud to cable : A drone framework for autonomous power line inspection. In *2020 23rd Euromicro Conference on Digital System Design (DSD)*, pages 503–509, 2020.
- [245] Google Scholar. Top publications ranking in human computer interactions. https://scholar.google.es/citations?view_op=top_venues&hl=en&vq=eng_humancomputerinteraction. Accessed : 2021-01-26.
- [246] Douglas Schuler and Aki Namioka. *Participatory design : Principles and practices*. CRC Press, 1993.
- [247] Leonid Sedov, Valentin Polishchuk, Thibault Maury, Maria Ulloa, and Darya Lykova. Qualitative and quantitative risk assessment of urban airspace operations.
- [248] SESAR JU. *U-space Blueprint*. Single European Sky ATM Research Joint Undertaking, 2017.
- [249] SESAR JU. U-space, 2020. <https://www.sesarju.eu/U-space>.
- [250] Daniel Baraldi Sesso, Lucio F. Vismari, Antonio Vieira da Silva Neto, Paulo S. Cugnasca, and Joao B. Camargo. An approach to assess the safety of ads-b-based unmanned aerial systems : Data integrity as a safety issue. *JOURNAL OF INTELLIGENT & ROBOTIC SYSTEMS*, 84(1-4, SI) :621–638, DEC 2016.

- [251] Ben Shneiderman. Direct manipulation : A step beyond programming languages (abstract only). In *Proceedings of the Joint Conference on Easier and More Productive Use of Computer Systems. (Part - II) : Human Interface and the User Interface - Volume 1981*, CHI '81, page 143, New York, NY, USA, 1981. Association for Computing Machinery.
- [252] Ben Shneiderman. Creativity support tools : Accelerating discovery and innovation. *Commun. ACM*, 50(12) :20–32, December 2007.
- [253] Todd Simpson. Real-time drone surveillance system for violent crowd behavior unmanned aircraft system (uas) – human autonomy teaming (hat). In *2021 IEEE/AIAA 40th Digital Avionics Systems Conference (DASC)*, pages 1–9, 2021.
- [254] Ashutosh Singandhupe, Hung Manh La, and David Feil-Seifer. Reliable security algorithm for drones using individual characteristics from an eeg signal. *IEEE ACCESS*, 6 :22976–22986, 2018.
- [255] Maninderpal Singh, Gagangeet Singh Aujla, Rasmeet Singh Bali, Sahil Vashisht, Amritpal Singh, and Anish Jindal. Blockchain-enabled secure communication for drone delivery : A case study in covid-like scenarios. In *Proceedings of the 2nd ACM MobiCom Workshop on Drone Assisted Wireless Communications for 5G and Beyond*, DroneCom '20, page 25–30, New York, NY, USA, 2020. Association for Computing Machinery.
- [256] Hannah Snyder. Literature review as a research methodology : An overview and guidelines. *Journal of Business Research*, 104 :333–339, November 2019.
- [257] P. Sockeel, E. Chatelain, M.-P. Massoure, P. David, X. Chapellier, and S. Buffat. Les chirurgiens peuvent apprendre des pilotes : place du facteur humain en chirurgie. *Journal de Chirurgie*, 146(3) :250–255, June 2009.
- [258] Lisa Stähli, David Rudi, and Martin Raubal. Turbulence ahead - a 3d web-based aviation weather visualizer. In *Proceedings of the 31st Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '18, page 299–311, New York, NY, USA, 2018. Association for Computing Machinery.
- [259] Mia N. Stevens, Hossein Rastgoftar, and Ella M. Atkins. Geofence boundary violation detection in 3d using triangle weight characterization with adjacency. *JOURNAL OF INTELLIGENT & ROBOTIC SYSTEMS*, 95(1) :239–250, JUL 2019.
- [260] Anselm Strauss and Juliet M Corbin. *Grounded theory in practice*. Sage, 1997.
- [261] Anselm Strauss and Juliet M Corbin. *Grounded theory in practice*. Sage, 1997.
- [262] Ethan Taylor and JJ Rivera. Hydrogen fuel cell-powered drone ambulance for the emergency medical services. *Future Energy*, 1(1) :6–11, Mar. 2022.
- [263] Kristian Husum Terkildsen and Kjeld Jensen. Towards a tool for assessing uas compliance with the jarus sora guidelines. In *2019 International*

- Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, pages 460–466, New York, NY, USA, 2019. IEEE.
- [264] D. Tezza and M. Andujar. The state-of-the-art of human–drone interaction : A survey. *IEEE Access*, 7 :167438–167454, 2019.
 - [265] Dante Tezza and Marvin Andujar. The state-of-the-art of human–drone interaction : A survey. *IEEE Access*, 7, 2019.
 - [266] Amila Thibbotuwawa, Grzegorz Bocewicz, Grzegorz Radzki, Izabela Nielsen, and Zbigniew Banaszak. Uav mission planning resistant to weather uncertainty. *Sensors*, 20 :515, 01 2020.
 - [267] John Thomason, Photchara Ratsamee, Jason Orlosky, Kiyoshi Kiyokawa, Tomohiro Mashita, Yuki Uranishi, and Haruo Takemura. A comparison of adaptive view techniques for exploratory 3d drone teleoperation. *ACM Trans. Interact. Intell. Syst.*, 9(2–3), mar 2019.
 - [268] Yifan Tian, Jiawei Yuan, and Houbing Song. Efficient privacy-preserving authentication framework for edge-assisted internet of drones. *JOURNAL OF INFORMATION SECURITY AND APPLICATIONS*, 48, OCT 2019.
 - [269] Marina Toeters, Martijn ten Bhömer, Eliza Bottenberg, Oscar Tomico, and Ger Brinks. Research through design : a way to drive innovative solutions in the field of smart textiles. In *Advances in Science and Technology*, volume 80, pages 112–117. Trans Tech Publ, 2013.
 - [270] Loc D Tran, Charles D Cross, Mark A Motter, James H Neilan, Garry Qualls, Paul M Rothhaar, Anna Trujillo, and Bonnie D Allen. Reinforcement learning with autonomous small unmanned aerial vehicles in cluttered environments-" after all these years among humans, you still haven't learned to smile.". In *15th AIAA aviation technology, integration, and operations conference*, page 2899, 2015.
 - [271] Trung Duc Tran, Jean-Marc Thiriet, Nicolas Marchand, and Amin El Mrabti. A cybersecurity risk framework for unmanned aircraft systems under specific category. *J. Intell. Robotics Syst.*, 104(1), jan 2022.
 - [272] Allen B. Tucker. *Computer science handbook*. Chapman Hall/CRC, 2 edition, 2004.
 - [273] Barbara Tversky. Cognitive principles of graphic displays. In *AAAI 1997 Fall Symposium on Reasoning with Diagrammatic Representations*, pages 8–10, 1997.
 - [274] Barbara Tversky. Some ways that maps and diagrams communicate. In *Spatial Cognition*, 2000.
 - [275] Hanif Ullah, Nithya Gopalakrishnan Nair, Adrian Moore, Chris Nugent, Paul Muschamp, and Maria Cuevas. 5g communication : An overview of vehicle-to-everything, drones, and healthcare use-cases. *IEEE ACCESS*, 7 :37251–37268, 2019.
 - [276] SESAR Joint Undertaking. European drones outlook study. <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/93d90664-28b3-11e7-ab65-01aa75ed71a1>. Accessed : 2021-01-25.

- [277] University of Canberra. Evidence-based practice in health, 2022. <https://canberra.libguides.com/c.php?g=599346&p=4149721>.
- [278] Université Laval. Réaliser une revue systématique, 2022. <https://www5.bibl.ulaval.ca/services/soutien-a-ledition-savante-et-a-la-recherche/syntheses-de-la-connaissance/realiser-une-revue-systematique>.
- [279] Hector Usach, Juan A. Vila, Christoph Torens, and Florian Adolf. Architectural design of a safe mission manager for unmanned aircraft systems. *JOURNAL OF SYSTEMS ARCHITECTURE*, 90(SI) :94–108, OCT 2018.
- [280] George Vachtsevanos, Benjamin Lee, Sehwan Oh, and Michael Balchanos. Resilient design and operation of cyber physical systems with emphasis on unmanned autonomous systems. *JOURNAL OF INTELLIGENT & ROBOTIC SYSTEMS*, 91(1, SI) :59–83, JUL 2018.
- [281] Bertold Van den Bergh and Sofie Pollin. Keeping uavs under control during gps jamming. *IEEE SYSTEMS JOURNAL*, 13(2) :2010–2021, JUN 2019.
- [282] I. Vasiliev, S. Freunds Schuh, D. M. Mark, G. D. Theisen, and J. McAvoy. What is a map? *The Cartographic Journal*, 27(2) :119–123, 1990.
- [283] Solveig Vidal. Visualisation de l’information : un panorama d’outils et de méthodes. Research Report INIST-V - 06-03, Institut de l’Information Scientifique et Technique (INIST-CNRS), May 2006.
- [284] Michael Vierhauser, Sean Bayley, Jane Wyngaard, Jinghui Cheng, Wandu Xiong, Robyn Lutz, Joshua Huseman, and Jane Cleland-Huang. Interlocking safety cases for unmanned autonomous systems in urban environments. page 416–417, 2018.
- [285] Dennis Vincenzi, David C Ison, and Brent A Terwilliger. The role of unmanned aircraft systems (uas) in disaster response and recovery efforts : Historical, current and future. 2014.
- [286] P. Volf. Simulation of uas integration into shared airspace for validation of impact on atm systems. In *2017 Integrated Communications, Navigation and Surveillance Conference (ICNS)*, pages 1–16, 2017.
- [287] Xiao Wang, Jianfu Zhang, Pingfa Feng, Dingwen Yu, and Zhijun Wu. A safety monitoring system for unmanned aerial vehicles. 2018.
- [288] Li Wei, Wang Ji Dong, and Li Meng Yang. A vision-based attitude/position estimation for the automatic landing of unmanned helicopter on ship. page 1–5, 2017.
- [289] Jianfa Wu, Honglun Wang, Na Li, and Zikang Su. Formation obstacle avoidance : A fluid-based solution. *IEEE SYSTEMS JOURNAL*, 14(1) :1479–1490, MAR 2020.
- [290] Mei-Min Wu, Yu-Xiang Xiao, and Qian Bi. Software design of monitoring and flight simulation for uav swarms based on osgearth. *INTERNATIONAL JOURNAL OF COMPUTATIONAL SCIENCE AND ENGINEERING*, 21(3) :346–354, 2020.

- [291] Ronglei Xie, Zhijun Meng, Lifeng Wang, Haochen Li, Kaipeng Wang, and Zhe Wu. Unmanned Aerial Vehicle Path Planning Algorithm Based on Deep Reinforcement Learning in Large-Scale and Dynamic Environments. *IEEE ACCESS*, 9 :24884–24900, 2021.
- [292] Yaqi Xie, Hao Wang, Chaoquan Luo, Zhuo YANG, and Yinwei ZHAN. Gazemetro : A gaze-based interactive system for metro map. In *The 23rd International ACM SIGACCESS Conference on Computers and Accessibility*, ASSETS '21, New York, NY, USA, 2021. Association for Computing Machinery.
- [293] Chenchen Xu, Xiaohan Liao, Junming Tan, Huping Ye, and Haiying Lu. Recent research progress of unmanned aerial vehicle regulation policies and technologies in urban low altitude. *IEEE ACCESS*, 8 :74175–74194, 2020.
- [294] Yifan Xu, Qian Zhang, Jingjuan Zhang, Xueyun Wang, and Zelong Yu. A Vehicle-Model-Aided Navigation Reconstruction Method for a Multicopter during a GPS Outage. *ELECTRONICS*, 10(5), MAR 2021.
- [295] Tao Yang, Peiqi Li, Huiming Zhang, Jing Li, and Zhi Li. Monocular vision slam-based uav autonomous landing in emergencies and unknown environments. *Electronics*, 7(5), 2018.
- [296] Chao Yin, Zhenyu Xiao, Xianbin Cao, Xing Xi, Peng Yang, and Dapeng Wu. Offline and online search : Uav multiobjective path planning under dynamic urban environment. *IEEE INTERNET OF THINGS JOURNAL*, 5(2, SI) :546–558, APR 2018.
- [297] Man-Ki Yoon, Bo Liu, Naira Hovakimyan, and Lui Sha. Virtualdrone : Virtual sensing, actuation, and communication for attack-resilient unmanned aerial systems. page 143–154, 2017.
- [298] Steven D. Young, Cuong Quach, Kai Goebel, and Jessica Nowinski. In-time safety assurance systems for emerging autonomous flight operations. In *2018 IEEE/AIAA 37th Digital Avionics Systems Conference (DASC)*, pages 1–10, 2018.
- [299] Weixin Zhai, Xiaochong Tong, Shuangxi Miao, Chengqi Cheng, and Fuhu Ren. Collision detection for uavs based on geosot-3d grids. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 8(7), 2019.
- [300] Xuejun Zhang, Yang Liu, Yu Zhang, Xiangmin Guan, Daniel Delahaye, and Li Tang. Safety assessment and risk estimation for unmanned aerial vehicles operating in national airspace system. *Journal of Advanced Transportation*, 2018.
- [301] Zhaoyue Zhang, Jing Zhang, Peng Wang, and Lei Chen. Research on operation of uavs in non-isolated airspace. *CMC-COMPUTERS MATERIALS & CONTINUA*, 57(1) :151–166, OCT 2018.
- [302] Yueyan Zhi, Zhangjie Fu, Xingming Sun, and Jingnan Yu. Security and privacy issues of uav : A survey. *MOBILE NETWORKS & APPLICATIONS*, 25(1, SI) :95–101, FEB 2020.

- [303] Wenyu Zhu and Richard Chapman. Stereo-vision-based collision avoidance simulation. page 156–159, 2019.
- [304] Yiyuan Zou, Honghai Zhang, Dikun Feng, Hao Liu, and Gang Zhong. Fast Collision Detection for Small Unmanned Aircraft Systems in Urban Airspace. *IEEE ACCESS*, 9 :16630–16641, 2021.
- [305] Raissa Zurli, Raissa Bravo, and Adriana Leiras. Literature review of the applications of uavs in humanitarian relief xxxv encontro nacional de engenharia de producao. 10 2015.
- [306] Hüseyin Erbil Özyörük. Systematic analysis and classification of the literature regarding the impact of human factors on unmanned aerial vehicles (uav), 2020.

Annexes

A Liste des publications

Balita H Rakotonarivo, Stéphane Conversy, Nicolas Drougard, Jérémie Garcia. Revue Systématique de la Littérature sur le Soutien à la Sécurité des Opérations de Drones. 32e Conférence Francophone sur l'Interaction Homme-Machine (IHM '20.21), Apr 2021, Metz, France.

<https://doi.org/10.1145/3450522.3451328>.

Balita Heriniaina Rakotonarivo, Nicolas Drougard, Stéphane Conversy, Jérémie Garcia. Sécurité avant tout ! Étude par entretiens de la planification de missions de drones pour guider la conception des systèmes soutenant les analyses de sécurité et les demandes d'autorisation. 33e Conférence Internationale Francophone sur l'Interaction Humain-Machine (IHM '22), Apr 2022, Namur, France.

<https://doi.org/10.1145/3500866.3516378>.

Balita Rakotonarivo, Nicolas Drougard, Stéphane Conversy, Jérémie Garcia. Supporting drone mission planning and risk assessment with interactive representations of operational parameters. 2022 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), Jun 2022, Dubrovnik, Croatia.

<https://doi.org/10.1109/ICUAS54217.2022.9836056>.

Balita H. Rakotonarivo, Nicolas Drougard, Stéphane Conversy, and Jérémie Garcia. 2023. Cleared for Safe Take-off? Improving the Usability of Mission Preparation to Mitigate the Safety Risks of Drone Operations. In Proceedings of the 2023 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '23), April 23–28, 2023, Hamburg, Germany. ACM, New York, NY, USA.

<https://doi.org/10.1145/3544548.3581003>.

B Sécurité Aéronautique

Les drones ou *Unmanned Aircraft Systems* (UAS) sont des aéronefs sans pilote à bord, particulièrement adaptés à la réalisation de tâches fastidieuses et/ou dangereuses. La maturité technologique de ces systèmes a conduit à de nouvelles applications telles que la livraison de médicaments, la surveillance de zones, ou encore la recherche et le sauvetage [264].

Une opération de drone est généralement composée de trois étapes : la préparation du vol en amont puis sur site, l'exécution du vol et l'après-vol qui inclut le traitement des données obtenues le cas échéant [31].

B.1 Aéronefs sans pilotes à bord

A l'origine, le terme drone désigne un aéronef piloté à distance. La multiplication des engins pilotés à distance a fait qu'il faut maintenant parler de drone terrestre, quand il évolue au sol, de drone marin ou drone sous-marin quand il évolue sur ou dans l'eau et de drone aérien ou volant quand il évolue dans les airs. Le terme drone originel désigne le vecteur aérien qui fait partie d'un système comprenant un aéronef sans pilote à bord ou Unmanned Aircraft (UA), pouvant être exploité de manière autonome ou être piloté à distance avec l'équipement servant à le contrôler [60, 139].

Les systèmes de drones [41] sont composés de trois segments principaux :

- le segment air, soit le ou les aéronefs composés de divers équipements (propulsion, batterie, électronique embarquée et capteurs) ainsi que leur charge utile (une caméra, des poches de sang, ou même des passagers non-pilote pour les futurs taxi volants) ;
- le segment sol, qui comprend la station de contrôle au sol, les éléments pour le décollage et la récupération ;
- le segment de communication, permettant le lien entre le segment sol et le segment air, et pouvant inclure l'usage de satellites.

Toutefois, il existe une diversité de formes, de taille, de masse et d'agencement possibles, selon les opérations à mener avec le système de drone. Cela se reflète avec les principales classifications existantes des systèmes de drones.

Classification des drones

Les systèmes de drones présentent de nombreuses caractéristiques techniques qui pourraient chacune servir de base pour un système de classification. Il existe plusieurs classifications officielles des drones, selon les institutions. L'Organisation de l'Aviation Civile Internationale (OACI), l'agence spécialisée et autonome des Nations-Unies en charge des questions d'aviation civile, classe les aéronefs sans pilote à bord en 3 catégories : les aéronefs utilisés pour l'aéromodélisme, les aéronefs pilotés à distance et les aéronefs autonomes [139].

La Radio Technical Commission for Aeronautics (RTCA), une organisation de standardisation américaine, dans son Standard DO-320 [238], propose entre autres de classer les drones selon la plateforme : à ailes fixes - comme les

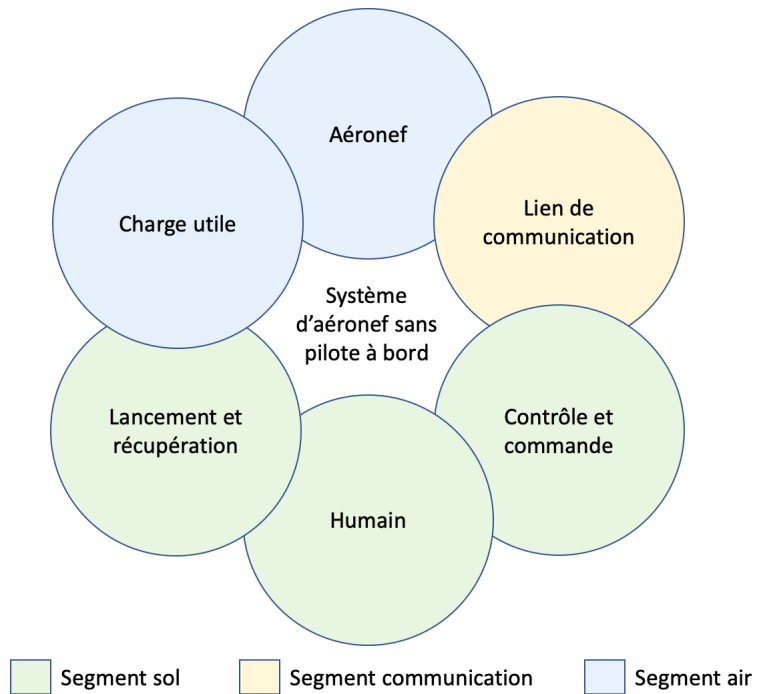


FIGURE 1 – Vue synthétique des éléments d'un système de drones - adapté de [41]

avions classiques ; à voilure tournante - celle qui inclut les multiroteurs et les hélicoptères ; les plus légers que l'air - comme les ballons ou les dirigeables ; à ailes battantes - qui imitent les oiseaux et les insectes battant des ailes pour se sustenter ; et les configurations hybrides ou convertibles qui associent les caractéristiques précédentes - par exemple un décollage vertical comme un multiroteur suivi d'un changement de l'angle des moteurs pour voler comme un avion.

L'Organisation du Traité de l'Atlantique Nord (OTAN) propose une classification basé sur la taille et l'endurance [50], visible dans le tableau 1. Cette classification possède l'avantage de refléter les capacités opérationnelles du système. Elle est détaillée dans le tableau 1.

Dans le sens décroissant des capacités, celle-ci distingue les High Altitude Long Endurance (HALE) pour Haute Altitude et Grande Endurance, les Medium Altitude Long Endurance (MALE) évoluant à une altitude moins élevée, les drones tactiques et les drones de taille plus modeste, pouvant être transportés par les opérateurs. Cette classification possède l'avantage de refléter les capacités opérationnelles du système. Ces différentes taille, masse, puissance disponible et capacités aériennes sont utilisées pour des opérations différentes.

Classe	Masse	Hauteur normale d'opérations	Endurance moyenne	Portée radio
Micro	<2 kg	60 m	<30 mn	5 km
Mini	2-20 kg	900 m	1-2 heures	25 km
Petit	>20 kg	1 500 m	2-3 heures	50 km
Tactique	150-600 kg	3 000 m	3-10 heures	200 km
MALE	>600 kg	14 000 m	24-48 heures	sans limite
HALE	>600 kg	20 000 m	24-48 heures	sans limite

TABLE 1 – Classification des drones - Source : OTAN [50]

B.2 Opérations de drones

Une opération de drone est constituée de trois grandes étapes : l'avant-vol, le vol en lui-même et l'après-vol [298].

- L'étape avant-vol regroupe toutes les activités nécessaires pour la préparation de l'exécution du vol. Il s'agit des activités de définition du concept d'opération : où va-t-on voler, quand, dans quelles conditions, pendant combien de temps, avec quelles ressources humaines, dans quel but, de la sélection du système voire de sa conception et sa construction dans le cas de drones conçus sur mesure mais non pas achetés sur étagère,... des activités d'études de sécurité et d'obtention des différentes autorisations nécessaires pour que le vol soit sûr et légal. Il s'agit de l'étape la plus longue durant une opération de drones [181]. Elle comprend aussi les activités de déploiement du système et des mesures de réduction du danger juste avant le début du vol proprement dit, ou pré-vol.
- L'étape du vol est celle pendant laquelle l'aéronef est exploité. Elle commence quand l'aéronef est prêt à manœuvrer en vue du vol et le moment où il s'immobilise à la fin du vol et où le système de propulsion principal est arrêté définitivement [140]. Les moments où l'aéronef est au sol pour des raisons de maintenance comme pour le remplacement des batteries ; ou des raisons de sécurité comme dans le cas d'un conflit avec un aéronef 'intrus', en appliquant le 'voir et éviter' font partie de cette étape.
- L'étape de l'après-vol comprend le repli du système si nécessaire, l'exploitation des données acquises le cas échéant, le traitement des événements de sécurité et des retours d'expérience.

D'un point de vue technique et sans considération de l'objectif du vol, on distingue deux types d'opérations : les missions en vue directe, ou *Visual Line of Sight* (VLOS) et les missions hors-vue, ou *Beyond Visual Line of Sight* (BVLOS).

Opération en ligne de vue ou Visual Line of Sight Ce sont les opérations durant lesquelles le pilote à distance doit maintenir un contact visuel permanent avec le drone, sans autres aides que des lunettes de correction de la vue [59]. Le

pilote est responsable de l'évitement de collision avec les autres aéronefs et les obstacles.

Opération hors-vue ou Beyond Visual Line of Sight Dès que le contact visuel entre le télépilote et l'aéronef ne peut pas être maintenu, l'opération est dite hors-vue. Les raisons possibles sont l'éloignement, la présence d'obstacles ou les conditions météorologiques.

Il existe un cas particulier où des observateurs externes assistent le pilote quand le drone s'éloigne trop de sa position et que la ligne de vue ne peut pas être maintenue : la ligne de vue étendue ou *Extended VLOS* [59]. Dans ce cas, des moyens de communication entre les différents individus participant à la surveillance des drones doivent être mis en place.

B.3 Importance des applications des drones

Historiquement, les drones servaient aux missions “Dirty, Dull, Dangerous” (3D) pour “Sales, monotones et dangereuses” [36]. *Sales* car ils étaient envoyés dans des environnements où les conditions seraient néfastes pour un pilote à bord, comme les endroits contaminés avec des produits chimiques ou avec de la radioactivité élevée. *Monotones* car ils permettaient d'automatiser le travail répétitif ou qui durait longtemps sans changement majeur pendant une grande partie du temps. *Dangereuses* car ils étaient utilisés dans les situations où la présence d'un pilote à bord n'était pas désirable à cause des risques pour son intégrité physique, comme lorsque les frères Wright testaient leurs commandes de vols à l'origine de l'aviation [41] ou pour servir de cible d'entraînement pour la défense anti-aérienne.

Aujourd'hui, il est difficile d'établir une liste exhaustive des domaines d'application actuels car les nouveaux usages se multiplient. Au delà d'une pratique de loisir, plusieurs grands domaines d'applications peuvent être dégagés : télé-mesures, inspections industrielles, photographie aérienne, surveillance et reconnaissance, réponse aux urgences, collecte d'informations atmosphériques ainsi que des applications requérant des interactions physiques avec des substances, des matériaux et des objets - dont la livraison par drones fait partie [36]. Récemment, d'autres cas d'utilisation sont développés, durant lesquels les drones sont utilisés plus près des humains comme drones compagnons, ou pour certaines manipulations comme dans les entrepôts de stockage ou pour le côté tangible pour les expérimentations en Réalité Virtuelle. Il s'agit du domaine d'Interactions Humain-Drones. Même si le domaine est en pleine effervescence, dans cette thèse nous ne nous intéressons pas aux Interactions Humain Drones elles-mêmes.

Intérêts publics ou sociétaux

L'exploitation des drones permet de répondre plus facilement aux urgences et de soutenir l'activité des équipes au sol. Par exemple, en cas d'incendie ou de sauvetage, un aéronef permet d'avoir une autre vision de la situation grâce à la perspective aérienne et permettra une meilleure gestion des ressources pour

savoir où concentrer les efforts [5]. De plus, l'acquisition des données est plus rapide avec un drone et les nombreuses charges utiles peuvent fournir des informations autrement inaccessibles. Une illustration est l'utilisation de caméras thermiques embarquées sur un drone dans une situation d'avalanche. La tâche de retrouver d'éventuelles personnes peut être rendue plus aisée. Les réseaux de télécommunications peuvent être étendus grâce à des essaims de drones, ce qui peut faciliter la coordination après des cataclysmes naturels [9].

Les drones peuvent servir à renforcer l'application des lois en vigueur et aux moments opportuns, permettant ainsi de gagner du temps par rapport aux façons de faire classiques. En effet, des cas d'applications comme l'enregistrement des scènes de crime, la surveillance ou le contrôle de la foule peuvent être réalisés de manière moins coûteuse, plus efficace et plus rapide [253].

Les drones préservent et sauvent des vies. L'inspection et la maintenance des infrastructures publiques ou l'entraînement des agents sont facilités par l'utilisation des drones et protègent les agents en évitant leur exposition à des conditions dangereuses [172, 244]. En matière de logistique, les drones peuvent servir à transporter différents types de colis, dont des gilets de sauvetage [204] ou des médicaments [1]. La voie aérienne permet d'arriver sur les lieux plus vite, par exemple pour amener un défibrillateur plus rapidement qu'avec une ambulance [262].

Intérêt opérationnel - Bénéfices économiques

L'usage des drones engendre aussi des bénéfices économiques. Les drones sont moins chers à construire, à faire homologuer, à entretenir par rapport à un aéronef avec pilote à bord [36]. De plus, ils peuvent être plus petits que les avions accueillant un pilote donc plus facilement manoeuvrables. Ils sont aussi plus faciles à déployer et à piloter. Le coût de la formation d'un télépilote professionnel est en moyenne deux fois moins cher que celui d'un pilote privé [196, 110].

Intérêts environnementaux et écologiques

Dans le monde actuel où penser à la durabilité est nécessaire, à cause des contraintes de changement climatique et de réchauffement global, la majorité des drones civils sont électriques. Des études sont en cours pour construire des drones à hydrogène [262]. Ainsi, à l'utilisation ils n'émettent pas de CO₂ et sont moins bruyants que les moteurs à pistons, les turbopropulseurs ou les turboréacteurs. En plus de rendre la propulsion des aéronefs moins émettrice d'agents polluants, l'application des nouvelles technologies associées aux drones permettent de réduire l'empreinte carbone de certaines activités. Par exemple, les feux d'artifice traditionnels produisent de nombreux composés nocifs pour la santé et l'environnement [16] et des alternatives comme des spectacles aériens avec des essaims de petits drones peuvent être plus intéressantes [135]. Enfin, certaines applications ont vocation à soutenir la protection de l'environnement comme les observations scientifiques de la composition de l'atmosphère [240] ou

de l'état des écosystèmes naturels [158, 232].

Une des conséquences de cette popularité et de ces bienfaits est que le nombre d'opérations augmentera considérablement, et dans toutes les parties du monde. Cette augmentation est prévue pour s'étaler sur plusieurs années, comme le prévoient différentes projections [97, 209, 105]. La multiplication de ces opérations accroît aussi les risques pour les tiers et les infrastructures au sol, ainsi que la perturbation voire la collision de l'aviation conventionnelle. Sans maîtrise, cette multiplication menace la sécurité aérienne en général.

B.4 Gestion de la sécurité aérienne

L'Organisation de l'Aviation Civile Internationale (OACI) est l'agence des Nations-Unies en charge d'établir le cadre réglementaire mondial de la sécurité de l'aviation civile internationale. Pour cela, l'OACI élabore et développe des normes et des pratiques recommandées visant à promouvoir le développement sûr et ordonné de l'aviation civile internationale.

Les systèmes d'aéronefs sans pilote à bords sont un sous-système du système de transport aérien national d'un pays, qui est lui-même un sous-système du transport aérien international. Une des conditions qui leur permet de voler est que leurs opérations exhibent ou démontrent au moins un niveau équivalent de sécurité à celui des avions avec pilotes à bord. Nous allons aborder les grandes lignes de la sécurité aéronautique pour aboutir au traitement de celle-ci pour le cas des drones.

Sécurité aéronautique et réglementation

La sécurité, l'efficacité, la sûreté, le développement économique et la protection de l'environnement sont les objectifs stratégiques de l'OACI. La sécurité est la priorité absolue de l'aviation.

Pour y arriver, l'OACI fournit des normes et pratiques recommandées qui doivent être mises en œuvre par chacun des états adhérents à l'organisation. Cela se traduit par la mise en place de textes réglementaires et d'activités pour les organisations impliquées dans l'aviation internationale comme les états ou les prestataires de service [140]. Le but de la réglementation est de permettre une exploitation en toute sécurité, tout en soutenant le développement économique de la filière aviation. Dans le cas de la France, c'est d'abord la Commission Européenne qui promulgue des lois au niveau européen, puis si cela est nécessaire des adaptations ou des dispositions supplémentaires sont adoptées au niveau national.

Définitions liées à la sécurité et aux risques en aéronautique

Les définitions suivantes sont basées sur l'annexe 19 de l'OACI, qui contient les normes et pratiques recommandées en matière de sécurité aéronautique [140]. La sécurité est un état dans lequel les risques liés aux activités aéronautiques concernant, ou impliquant directement, l'exploitation des aéronefs sont réduits

et maîtrisés à un niveau acceptable [142]. Cela implique donc que les risques ne peuvent pas être totalement neutralisés mais correctement maîtrisés. Le terme *sécurité*, ou *safety* en anglais, concerne la prévention d'événements involontaires pouvant se produire, alors que le terme *sûreté*, ou *security* en anglais, concerne la prévention des actions malveillantes volontaires.

Un accident est un événement lié à l'utilisation d'un aéronef au cours duquel *soit* une personne est mortellement ou grièvement blessée du fait qu'elle ait été dans l'aéronef, ou en contact avec une partie quelconque de l'aéronef y compris celles qui s'en sont détachées, ou directement exposée au souffle des réacteurs ; *soit* l'aéronef subit des dommages à tel point que ses caractéristiques de résistance structurelle, de vol ou de performances sont altérées et qu'un remplacement ou une réparation importante des éléments incriminés soit nécessaire ; *soit* que l'aéronef ait disparu ou est totalement inaccessible . Dans le domaine du trafic aérien, le risque d'accident s'exprime en nombre d'accident par heure de vol.

Un incident est un événement, autre qu'un accident, lié à l'utilisation d'un aéronef, qui compromet ou pourrait compromettre la sécurité de l'exploitation.

Un danger ou événement redouté est une situation ou un objet pouvant causer un incident ou un accident d'aviation ou y contribuer. L'ISO 31000 :2018 [148] définit une source risque comme *"tout élément qui, seul ou combiné à d'autres, présente un potentiel intrinsèque d'engendrer un risque"*, ce qui est assimilable à un danger.

Un risque est la combinaison de la probabilité la plus élevée ou de la fréquence d'un événement aux conséquences dommageables provoqué par un danger et de la gravité de ces conséquences .

Un domaine à risque majeur ou *key risk area* est le type d'accident le plus probable en lequel un événement aurait pu dégénérer. Il s'agit souvent de la conséquence dans le pire des cas. Par exemple, une violation de l'espace aérien ou des instructions du contrôle aérien pourrait engendrer une collision entre deux aéronefs.

Une mitigation ou une défense est une mesure d'atténuation spécifique, un contrôle préventif ou une mesure de rétablissement mise en place pour empêcher qu'un événement redouté se réalise ou s'accroisse jusqu'à une conséquence indésirable. La prévention consiste à réduire la fréquence d'apparition du risque. La protection consiste à réduire les conséquences liées à l'apparition du risque.

Un objectif de sécurité est une déclaration qualitative ou quantitative définissant la fréquence ou la probabilité maximales auxquelles un risque pourrait se produire .

Un niveau de risque acceptable désigne les objectifs de sécurité minimaux qui doivent être atteints, en terme de probabilité d'accident dans les airs ou au sol [2]. Atteindre un niveau de risque acceptable est un problème requérant un compromis difficile entre plusieurs facteurs, dont la technique, les aspects politique, économique, social et psychologique [58].

Gestion de la sécurité en aéronautique

Selon le Manuel de la gestion de la sécurité de l'OACI [142], la gestion de la sécurité vise à atténuer de manière proactive les risques de sécurité avant que ceux-ci n'entraînent des accidents et des incidents d'aviation. Sa mise en œuvre permet aux États de gérer leurs activités de sécurité d'une façon plus disciplinée, intégrée et ciblée. Cette thèse se focalise intentionnellement sur la sécurité de l'exploitation des aéronefs, en particulier les aéronefs sans pilote à bord et ne concerne pas les éléments de santé, d'environnement et de sécurité au travail.

La *gestion des risques de sécurité* est un élément clé de la gestion de la sécurité. Le processus de gestion des risques de sécurité, à la figure 2, inclut l'identification des dangers, l'évaluation des risques de sécurité, l'atténuation des risques de sécurité et l'acceptation des risques [142]. Cette étude des risques ou *risk assessment* en anglais, doit aussi être menée à chaque fois qu'un changement peut impacter la sécurité des services et de la situation existante.

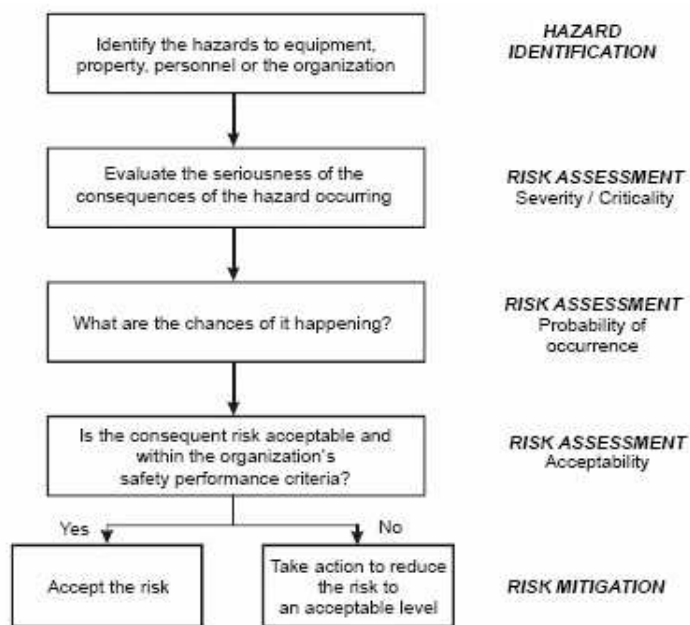


FIGURE 2 – Le processus de la gestion des risques de sécurité -
Source : Manuel de la Gestion de la Sécurité - OACI

Identification des dangers La coexistence de l'aviation avec des dangers est acceptable, à condition que ces derniers soient maîtrisés [142]. Un danger et ses conséquences sont souvent confondus. Par exemple, une réduction de la

visibilité due à un brouillard (danger) peut causer une collision avec un obstacle au sol (conséquence) ou une piste contaminée (danger) peut causer une sortie de piste (conséquences). Identifier clairement un danger permet de déterminer ses conséquences possibles et ensuite de trouver les défenses les plus adaptées. L'identification des dangers doit prendre en considération l'environnement opérationnel, les équipements qui y sont exploités, les humains présents ou participant à l'opération ainsi que les procédures mises en oeuvre.

Il existe 2 grands groupes de méthodes d'identification des dangers : *réactif* quand la méthode se base sur l'analyse de résultats ou d'événements passés ; et *proactif* qui consiste à collecter des données de sécurité provenant d'événements aux conséquences mineures ou des données sur la performance des processus et à analyser les informations de sécurité ou la fréquence des événements afin de déterminer si un danger pourrait entraîner un accident ou un incident [142].

Évaluation des risques de sécurité Un risque de sécurité s'évalue selon deux dimensions : la probabilité et la gravité. Le Manuel de la Gestion de la Sécurité de l'OACI définit la probabilité des risques de sécurité comme la probabilité d'occurrence d'une conséquence ou d'un résultat en matière de sécurité. Il est important d'envisager une série de scénarios de façon à ce que toutes les conséquences potentielles puissent être prises en compte [142]. Un événement est considéré comme prévisible si toute personne raisonnable avait pu prévoir que ce type d'événement se produirait dans les mêmes circonstances. Il n'est pas possible d'identifier tous les dangers imaginables ou théoriquement possibles.

Une fois l'évaluation de la probabilité achevée, l'étape suivante consiste à évaluer la gravité du risque de sécurité, en tenant compte des conséquences qui pourraient être liées au danger. La gravité du risque de sécurité est définie comme l'étendue du dommage qui pourrait raisonnablement se produire en conséquence ou comme résultat du danger identifié. L'évaluation de la gravité devrait envisager toutes les conséquences possibles d'un danger, en tenant compte de la situation la plus défavorable prévisible [142].

L'indice de risque de sécurité est créé à partir des résultats des scores de probabilité et de gravité. Ces deux dimensions d'un risque peuvent être présentées sous-forme d'un tableau, formant alors une matrice d'évaluation des risques de sécurité.

L'indice obtenu à partir de la matrice d'évaluation des risques de sécurité devrait ensuite être exporté vers une matrice d'acceptabilité ou encore matrice de tolérabilité du risque de sécurité qui décrit — sous forme narrative — les critères de tolérabilité pour l'organisation en question.

Acceptation des risques En sortie de la matrice d'acceptabilité, un critère qualitatif est appliqué à chacun des risques. Les risques de sécurité sont évalués conceptuellement comme étant acceptables, tolérables ou intolérables [142].

- ACCEPTABLE en l'état : aucune autre mesure d'atténuation du risque n'est nécessaire.

- TOLÉRABLE : le risque peut être toléré en fonction de l'atténuation des risques de sécurité.
- INTOLÉRABLE : le risque est inacceptable dans toutes les circonstances. Il faut adopter des mesures immédiates pour atténuer le risque ou arrêter l'activité. Il est nécessaire de réaliser une atténuation prioritaire des risques de sécurité afin de garantir que des contrôles préventifs additionnels ou renforcés sont en place pour abaisser l'indice des risques de sécurité à un niveau tolérable.

Atténuation des risques de sécurité L'atténuation des risques de sécurité est assimilable à la maîtrise des risques de sécurité. L'objectif est de ramener les risques de sécurité à un niveau acceptable. Pour cela, il faut appliquer des mesures appropriées afin d'éliminer ces risques ou de les réduire. Les axes potentiels de maîtrise d'un risque de sécurité sont la réduction de la gravité de ses conséquences, la réduction de la probabilité de son occurrence et la réduction à l'exposition à ce risque. Il est plus aisé et courant de réduire la probabilité que de réduire la gravité. Les mesures classiques de maîtrise des risques de sécurité reposent sur la technologie, la formation, les processus et les procédures [142].

Les mesures d'atténuation de risques de sécurité ont pour conséquence des modifications des équipements, des infrastructures ou des procédures opérationnelles. Selon le Manuel de la Sécurité de l'OACI [142], les stratégies d'atténuation des risques de sécurité sont l'*évitement*, qui consiste à annuler ou éviter l'opération car le risque de sécurité est supérieur aux avantages à tirer de sa poursuite ; la *réduction*, qui consiste à réduire la fréquence de l'opération ou l'ampleur des conséquences du risque de sécurité ; et la *ségrégation*, qui consiste à isoler les effets des conséquences du risque de sécurité ou pour instaurer une redondance afin de se protéger contre ces effets.

Les drones sont une sous-partie du système de l'aviation internationale, mais puisqu'ils diffèrent de l'aviation avec pilote à bord sur plusieurs points, la section suivante aborde plus en détail la sécurité des opérations de drones.

B.5 Sécurité des opérations de drones

Les caractéristiques des drones, comme l'absence de pilote à bord, la nécessité d'être conforme aux exigences réglementaires à tous les usagers de l'espace aérien et la proximité avec le sol dans le cas des petits drones requièrent des particularismes dans la gestion de la sécurité de leurs opérations [27]. L'apparition des UAS implique une adaptation du système de l'aviation. Ce changement nécessite qu'une étude de risques soit menée [142], en appliquant les principes vu à la section précédente. En déroulant les étapes du processus de gestion des risques vu à la section précédente, nous aborderons les dangers présentés par les drones et leurs conséquences (identification), les différentes méthodes d'évaluation des risques possibles (évaluation) et les mesures d'atténuation mises en place (mitigation), à savoir la réglementation sur les drones et les services qui en découlent.

Les dangers liés à l'exploitation de drones

L'introduction des aéronefs sans pilote à bord dans le système de l'aviation conventionnelle crée inévitablement des dangers. Des experts académiques et des experts employés par les agences de la sécurité de l'aviation civiles ont traité l'identification des dangers liés à l'exploitation des drones. L'article séminal de Hayhurst et al. [130] a redéfini les niveaux de gravité des dangers lors des opérations de drones à partir des dangers connus de l'aviation avec pilotes à bord et en prenant compte de leurs caractéristiques propres. Ensuite, ces dangers ont été déterminés et classifiés à l'aide d'une Functional Hazard Assessment (FHA) pour un modèle générique de drone pour de potentiels événements redoutés pendant la phase de vol. En partant des fonctions principales à réaliser pendant un vol de drones, à savoir "faire voler l'aéronef", "naviguer", "communiquer" et "se prémunir et atténuer les dangers potentiels" puis de leur décomposition fonctionnelle, les dangers et leurs conséquences opérationnelles sont identifiés point par point. Au total, 132 conditions de défaillance ont été déterminés, réparties entre les fonctions principales du système de drone. Les perspectives de cette étude sont l'approfondissement des conséquences ces conditions de défaillance sur les équipages, les communications et le système de gestion du trafic aérien.

Dans une approche plus systémique, Clothier [58] place l'étude des risques des opérations de drones dans un contexte prenant en compte la gestion du trafic aérien, l'aspect humain et un système de gestion de la sécurité. Il estime, à raison, qu'il est insuffisant de prendre séparément les éléments du système pour identifier les dangers puisque le tout est plus que la somme des parties. A partir des données d'accidents/incidents de drones du ministère américain de la défense (Department of Defense), il classe les conditions de défaillance dans 5 catégories, à savoir les éléments propulsifs, les éléments pour contrôler le vol, les éléments au sol, les éléments de communication et les autres dont les problèmes relatifs à l'usage de l'espace aérien. Il synthétise certaines méthodes d'identification des dangers et d'évaluation des risques pour un système de drones. Puis il propose des recommandations pour le traitement, l'élaboration et la sélection des mitigations à mettre en oeuvre pour chaque risque. Son étude fournit des statistiques sur les causes des accidents et leur proportion par rapport aux éléments d'un système, mais elle ne prend pas en compte les petits drones mais plus généralement les drones plus imposants et pour des événements entre 1993 et 2003. La synthèse des méthodes d'identification des dangers commence à dater et mérite d'être enrichie avec les contributions les plus importantes apparues ces dernières années.

En étudiant les accidents et incidents pouvant résulter d'une opération de drone, Dalamagkidis et al. [66] ont déterminé les conséquences néfastes possibles. Elles peuvent se classer en blessures voir décès de personnes, dommages importants voire perte du système, des dommages à aux autres biens et des impacts négatifs sur l'environnement et la société.

Plus récemment, Belcastro et al. [27], toujours dans une approche systémique, a caractérisé le problème d'identification des risques liés aux opérations et au trafic de drones. Ils le considèrent comme un problème multidimensionnel

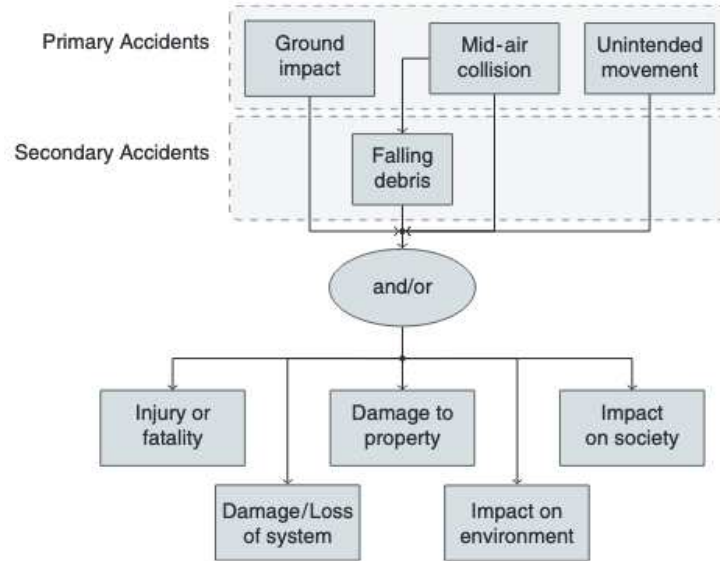


Fig. 5.3 Primary and secondary accidents that can result from the operation of UAS and their possible outcomes

FIGURE 3 – Accidents potentiels durant une opération de drone - Source : [66]

où sont pris en compte 1) les sources de dangers et leurs conséquences potentielles à plusieurs niveaux : véhicule, environnement, opérations, le système de gestion de trafic ; 2) la densité de population à plusieurs niveaux allant de quasi vide à surpeuplé ; et 3) la complexité opérationnelle allant d'un seul drone opéré en ligne de vue sans autre aéronef aux alentours à des essaims de drones autonomes, hors-ligne de vue dans un trafic coopératif. Leur étude traite 100 événements relatifs aux petits drones, de moins de 25kg et compile des données issues de plusieurs sources dont les données du DoD et des médias. Elle identifie aussi les dangers actuels et à venir, sur la base de jugements d'experts, sur des cas d'utilisation actuels et envisagés, ces derniers ayant été récupérés d'articles académiques prospectifs.

[27] synthétise les dangers potentiels des aéronefs semi-automatisés évoluant en hors-vue dans un espace aérien partagé avec plusieurs autres systèmes de drones, dont les essaims. Les dimensions de la complexité opérationnelle et de la densité de population survolée sont bien couvertes mais les auteurs se sont restreints au niveau de l'aéronef en ce qui concerne les sources du danger. Larrow [2], de la FAA, couvre les dangers potentiels en prenant en compte l'environnement opérationnel et l'intégration à un système de gestion de trafic de drones mais pas seulement limité à l'aéronef en vol. Il classe les dangers selon 4 catégories principales, notamment l'environnement d'opérations, l'impossibilité de "voir et éviter", la détérioration des systèmes externes et les erreurs humaines

Hazard Category	Hazard Causes
Technical Issue with UAS	
	Propulsion System Failure
	FCS Failure
	Loss of C2 Link
	GPS receiver fails
	GCS Failure
Deterioration of external systems	
	Loss of ground radar
	RangeVue failure
	Ops van power failure
	Wide Area Network (WAN) failure
	Crew communication failure
	GPS service fails
Human Error	
	Preflight planning errors
	Maintenance errors
	Crew fatigue
	Improper communication RPIC/RPIC or RPIC/EO
Adverse Operating Conditions	
	Flight into conditions beyond aircraft limitations
Unable to See and Avoid	
	DAA system does not detect intruder

Risk Identification

FIGURE 4 – Identification des risques pour une opération de drones - Source : [2]

- Tableau 4. Dans cette dernière catégorie, il note classe les erreurs lors de la planification de mission, les erreurs de maintenance, la fatigue et une mauvaise communication entre les pilotes à distance ou entre le pilote et les observateurs externes. Allouch et al. [10] prend en compte des dangers liés à la cybersécurité. Leur étude les différents dangers potentiels pour un système de drone piloté via internet en deux catégories : interne et externe. Dans les dangers intrinsèques au système de drones ou interne, dans les sources des erreurs humaines, ils indiquent un manque de culture de la sécurité, des erreurs de pilotage et les risques liés à la cybersécurité : les vulnérabilités liées à l'humain qui permettraient d'exploiter les défaillances de la station de contrôle, de l'aéronef et des communications.

L'Agence Européenne pour la Sécurité de l'Aviation (EASA) a identifié les

domaines à risque majeur comme les conflits en vol, les collisions avec des personnes ou des biens au sol, la perte de contrôle, les défaillances moteurs et les autres défaillances du système [94]. Les causes identifiées sont d'ordre opérationnel, technique et humain. Premièrement, la catégorie "opérationnel" concerne les écarts par rapport aux opérations normales, la gestion des trajectoires, la violation des espaces aériens contrôlés ou la proximité avec les autres aéronefs en espace aérien non contrôlé. Deuxièmement, la catégorie "technique" concerne les défaillances du système de contrôle, du système de propulsion ainsi que des générateurs d'énergie. Finalement, la catégorie "humain" concerne la maintenance ou la construction du système, la connaissance et la culture aéronautiques des exploitants et pilotes à distance et la préparation de missions.

Évaluation des risques liés aux opérations de drones

Dans la plupart des cas, les méthodes d'identification et d'évaluation des dangers ne sont pas spécifiques à l'aviation [148]. Il existe de nombreuses revues de ces méthodes, pour différents domaines : la santé [117], les traitements et processus en chimie [63], le génie civil [223], la navigation maritime [210] : l'aviation civile [205], et le domaine des drones [21]. EUROCONTROL a publié un rapport sur 520 méthodes et techniques pouvant être appliquées durant les études de sécurité dans le cadre de son programme européen de gestion du trafic aérien [93]. Pour en citer quelques unes : Bow-Tie, Functional Hazard Assessment (FHA), Hazard and Operability study (HAZOP), Failure mode, effects and critically analysis (FMECA), Use of Expert Judgement, Check Lists, What if?, Monte Carlo simulations, Bayesians Beliefs Networks, etc.

D'une part, la recherche dans l'évaluation des risques est foisonnante et de nombreuses approches ou méthodes innovantes sont créées. Elles s'inspirent de celles existantes ou les combinent afin de tirer profit des avantages de chacune des méthodes. Par exemple, [27] utilise à la fois des données d'accident et des cas d'applications prospectifs trouvés dans la littérature, puis un jugement d'experts pour en tirer des conclusions. [10] exploite d'abord une approche qualitative basée sur les standards internationaux pour étudier la sécurité d'une opération de drones sur un cas d'utilisation spécifique, puis dans un second temps se servir des résultats en entrée de réseaux bayésiens pour modéliser les risques liés au vol de l'aéronef. [53] réalise une analyse basée sur System-Theoretic Process (STPA) pour déterminer les dangers et les exigences de sécurité pour les opérations de petits drones puis adapte la méthodologie *Risk Situation Awareness Provision Capability* pour quantifier les différences entre 4 modèles de drones, afin d'évaluer la mesure dans laquelle ils remplissent les exigences de sécurité identifiées.

D'autre part, la diversité des systèmes de drones et les possibilités d'applications font que les exigences de sécurité doivent être proportionnelles aux risques encourus. Ainsi, une matrice de tolérabilité unique pour à la fois les gros drones et les petits est inappropriée [66].

Enfin, l'approche traditionnelle des risques en aviation, où il faut certifier toute la chaîne depuis le type de l'aéronef, chacun des exemplaires construits,

les opérations envisagées par l'exploitant et ensuite exiger une license pour le pilote, semble inadaptée aux opérations de drones. Certes, les gains en matière de sécurité sont reconnus mais cela engendrerait des difficultés, des coûts et des délais qui pourraient empêcher le développement du secteur [2]. Sans négocier la sécurité à la baisse, l'OACI demande aux opérations de drones un niveau équivalent de sécurité à celui de l'aviation avec pilote à bord [139]. Ainsi, une approche dite *holistique* est prônée. Elle s'appuie sur toutes les mitigations utilisées durant une opération de drone en plus de celles implémentées durant la conception de l'aéronef pour démontrer que ladite opération peut être réalisée avec un niveau de risque acceptable [2].

Une méthodologie nommée *Specific Operation Risk Assessment* (SORA) a été développée afin de systématiser les études de sécurité des opérations de drones et pour intégrer l'approche holistique [104].

Specific Operation Risk Assessment La SORA ou Analyse de sécurité pour les opérations de la catégorie spécifique est une méthodologie publiée par la Joint Authorities for Rulemaking on Unmanned Aircraft Systems (JARUS). Cette entité est regroupée des institutions et des experts internationaux rassemblant des compétences réglementaires en vigueur dans le monde entier. Les constructeurs d'aéronefs, les associations d'aviation, les fournisseurs de services de la navigation aérienne, les organismes produisant les standards et les industriels y sont représentés [103]. L'EASA, EUROCONTROL et des experts issus de 56 pays contribuent aux travaux issus de JARUS.

Selon JARUS, la méthodologie permet de créer, évaluer et réaliser une opération de drones [104]. La méthodologie d'évaluation SORA est un processus itératif d'identification systématique des risques associés aux exploitations complexes de drone : les requérants choisissent en dix étapes où, quand et comment ils exploiteront leur drone sans danger pour des personnes ou des objets dans les airs ou au sol. Au terme du processus, on obtient une image précise du type d'exploitation prévu, des risques qui y sont associés et des mesures d'atténuation nécessaire. Elle permet ainsi de déterminer si une opération est réalisable d'une façon sûre. Cependant, elle ne doit pas être utilisée comme une liste de contrôle. Elle ne doit pas non plus être vue comme la réponse à tous les défis concernant la réalisation des opérations de drones. A partir de l'analyse du risque air et du risque sol lors d'une opération de drone, cette méthodologie permet d'établir des objectifs de sécurité opérationnels à atteindre, afin de déterminer les meilleurs moyens à mettre en œuvre pour rendre ces risques acceptables. Pour réaliser cette flexibilité, elle ne contient pas de prescriptions sur les exigences mais des objectifs de sécurité à atteindre proportionnellement au risque. Il s'agit donc d'une méthodologie basée sur les risques et centrée sur l'opération. La figure 2.2 montre les principales étapes du processus SORA, issue de [104].

Atténuation des risques pour les opérations de drones

Pour atténuer les risques relatifs à l'aviation, l'OACI impose des normes qui doivent être traduites en textes réglementaires par les États. La mise en

oeuvre des préconisations de ces textes doit permettre d’avoir des systèmes, des équipements, des services et des acteurs opérant quotidiennement avec un niveau de sécurité maîtrisé. Pour l’Europe, la réglementation de sécurité applicable aux drones a deux objectifs principaux. D’une part, elle assure la sécurité des autres usagers de l’espace aérien en réduisant le risque de collision en vol. D’autre part, elle assure la sécurité des biens et des personnes au sol en limitant le risque de crash.

B.6 La réglementation appliquée aux drones

De nombreuses régions du monde ont commencé à adopter une réglementation pour les drones, conformément aux normes et pratiques recommandées de l’OACI. Dans cette thèse, nous nous focaliserons sur celle en vigueur en France. En plus de la sécurité opérationnelle, l’un des objectifs des réglementations européennes est de favoriser un marché unique pour les drones, tant pour leur conception et fabrication que pour leur exploitation sûre. Des règlements européens ont été sortis ces dernières années pour soutenir cette vision [276]. De plus, la réglementation européenne prévoit que chacun des pays puissent rajouter d’autres éléments réglementaires au dessus du socle commun européen.

Les règlements BR 2019/945 et IR 2019/947

La Commission Européenne a publié en juin 2019 deux règlements portant sur les UAS qui expriment des exigences sur l’importation et la fabrication des drones [60], ainsi que sur les règles et procédures applicables à leur exploitation [59]. En France, c’est la Direction Générale de l’Aviation Civile (DGAC) qui met en oeuvre cette réglementation [195]. Ce cadre réglementaire est en vigueur depuis le 01er janvier 2021. Il est applicable dans l’ensemble des États membres de l’Union européenne, ainsi qu’en Islande, au Liechtenstein, en Norvège, et en Suisse. L’approche mise en oeuvre pour garantir la sécurité des opérations de drones consiste à identifier les risques et à fournir des moyens de mitigation pour les réduire en dessous de seuils acceptables. Par exemple, le risque induit par la proximité d’une zone de vol en parachute pourra être mitigée par la réalisation de la mission considérée à une heure pour laquelle la probabilité de croiser un parachutiste est très faible ; ou la demande d’une zone réservée temporairement au drone seul. Les opérations sont classées en trois catégories d’exploitation : ouverte, spécifique ou certifiée, selon les risques qu’elles présentent. Les risques considérés concernent les autres objets présents dans les airs (risque air) ou ceux présents au sol (risque sol). Ces catégories sont décrites dans les sections suivantes dans un ordre de risques croissants.

Catégorie d’exploitation ouverte La catégorie ouverte permet les opérations des UAS à faible risque. Ils s’agit de vols en vue directe, avec des aéronefs de masse inférieure à 25 kg. Dans cette catégories, les vols ne sont soumis à aucune autorisation préalable. Selon le poids du drone et sa vitesse, il est possible de survoler des personnes (masse inférieure à 250g) ou de voler à proximité

(masse inférieure à 900g). Pour les drones plus lourds, une distance minimale avec les personnes, zones résidentielles, commerciales et industrielles doit être maintenue (au moins 30m pour un drone de moins de 4kg et au moins 150m sinon). La hauteur maximale à laquelle les drones pourront s'élever est fixée à 120m dans l'espace aérien à très basse altitude ou *Very Low Level* (VLL), Toutefois, cet espace aérien n'est pas forcément vide et d'autres usagers peuvent aussi l'exploiter (planeur, parachutisme, hélicoptères).

Catégorie d'exploitation spécifique La catégorie spécifique permet des opérations à risques modérés, quand les conditions en catégorie ouverte ne sont plus respectées, comme lorsque le vol est hors-vue ou est réalisé dans des endroits représentant un risque plus important pour les tiers (en zone peuplée, à proximité d'un aéroport, etc.). Pour voler dans cette catégorie, il est nécessaire de demander et d'obtenir une autorisation de la Direction de la Sécurité de l'Aviation Civile (DSAC) en France, qui est l'autorité nationale compétente chargée de la surveillance et de la certification dans le domaine de l'aviation civile.

Les autorisations sont délivrées sur la base d'une analyse de risque [59]. Un moyen acceptable de conformité pour cette analyse, reconnu par l'EASA est la SORA [96]. La réglementation européenne prévoit aussi que l'on puisse voler avec une simple déclaration dans le cadre de scénarios standards (STS) ou des études de risques prédéfinies (PDRA). Si l'opération de drones se conforme à ces exigences, alors une simple déclaration est suffisante car les risques ont déjà été évalués de façon générique pour ces scénarios.

Catégorie d'exploitation certifiée Cette catégorie concerne les drones d'une dimension caractéristique supérieure ou égale à 3m, ou conçus pour être exploités au-dessus d'un rassemblement de personnes, pour le transport de personnes, ou pour le transport de marchandises dangereuses, exigeant donc une grande robustesse afin d'atténuer les risques pour les tiers en cas d'accident. Ces vols nécessitent la certification du drone, dans un cadre similaire à celui des aéronefs avec pilotes à bord, ainsi que la certification de l'exploitant et, le cas échéant, la possession d'une licence particulière pour le pilote à distance.

Les règlements IR 2021/664, IR 2021/665 et IR 2021/666

Ces trois règlements européens établissent le cadre réglementaire et les exigences de la gestion du trafic de drones ou *Unmanned Aircraft Traffic Management* (UTM) en Europe. L'UTM doit faciliter l'accès aux drones évoluant en hors-vue et à moins de 120 mètres de hauteur au-dessus du sol [159]. Il permet de séparer les aéronefs et offre une déconfliction qui vise à réduire le risque de collision dans les airs. En effet, le nombre de drones en exploitation va augmenter considérablement dans les prochaines années. Même si la hauteur maximale de 120 mètres au-dessus du sol offre une garantie de séparation par rapport à l'aviation traditionnelle, cet espace aérien commencera à se remplir

et de nombreux problèmes d'accès concurrents devront y être résolus. La Commission Européenne souhaite créer un système UTM européen appelé U-Space [249].

U-Space est un ensemble de services pour garantir une insertion sûre, sécurisée et efficace des drones dans l'espace aérien. Il est prévu une mise en oeuvre de ce système selon 4 étapes incrémentales (U1 à U4) sous formes de groupes de services pour le U-Space [248].

- U1 (fondation) : couvrant l'enregistrement en ligne, l'identification et le géorepérage.
- U2 (initiale) : couvrant la gestion des opérations de drones comprenant la planification des vols, l'autorisation des missions, le tracking et l'interface avec le trafic aérien conventionnel.
- U3 (avancée) : couvrant le support aux opérations complexes dans les zones denses comprenant la détection de conflits ou les fonctionnalités d'évitement de collision.
- U4 (totale) : un très haut niveau d'automatisation, de connectivité et de numérisation liés avec l'aviation générale.

Le texte IR 2021/664 : U-Space établit les règles régissant l'exploitation en toute sécurité d'UAS dans l'espace aérien U-space, l'intégration en toute sécurité des UAS dans le système aéronautique et la fourniture de services U-space.

Le texte IR 2021/665 : Fourniture des services de la navigation aérienne en espace aérien U-Space inclus dans un espace aérien contrôlé établit les règles de gestion de la superposition des espaces aériens contrôlés traditionnels et les nouveaux espaces aériens U-space.

Le texte IR 2021/666 : Avions avec pilotes à bord volant en espace aérien U-space établit les règles de gestion de l'impact de l'introduction des espaces aériens U-space pour les pilotes traditionnels qui devront y évoluer ou les traverser.

B.7 Les cartes en aéronautique

La cartographie aéronautique est l'ensemble des études et activités scientifiques, techniques et artistiques participant à la conception et l'exploitation de représentations cartographiques visant à aider la navigation aérienne [81]. Les cartes ont été utilisées depuis l'aube de l'aéronautique [194]. D'abord les cartes topographiques sur lesquelles des annotations ont été tracées pour aider durant la navigation à vue et ensuite adaptées à chaque grande étape de la modernisation de l'aviation : pour représenter les balises, les équipements et les procédures pour la navigation aux instruments, pour montrer la géographie à grande échelle et la préparation des vols lors de l'adoption des turboréacteurs facilitant ainsi

les vols à longs courriers, pour améliorer la conscience de la situation lors des évolutions de la technologie avec les équipements à bord comme le Traffic and Collision Avoidance System (TCAS) ou les radars météorologiques, etc.

La production de cartes aéronautiques est mandatée par l'OACI et fait partie intégrante de l'information aéronautique. Selon l'annexe 15 sur les Services de l'Information Aéronautique de l'OACI [138], les principales informations aéronautiques sont regroupées sous des publications comme :

- la Publication d'informations aéronautiques ou *Aeronautical Information Publication (AIP)* : publication d'un État, ou éditée par décision d'un État, renfermant des informations aéronautiques de caractère durable et essentielles à la navigation aérienne.
- le NOTAM ou *Notice to Airmen* : avis diffusé par télécommunication et donnant, sur l'établissement, l'état ou la modification d'une installation, d'un service, d'une procédure aéronautiques, ou d'un danger pour la navigation aérienne, des renseignements qu'il est essentiel de communiquer à temps au personnel chargé des opérations aériennes.
- la Circulaire d'information aéronautique ou *Aeronautical Information Circular(AIC)* : avis contenant des renseignements qui ne satisfont pas aux conditions d'émission d'un NOTAM ou d'insertion dans une AIP, mais qui concernent la sécurité des vols, la navigation aérienne, ou d'autres questions techniques, administratives ou législatives.

Bien que sous forme textuelle, ces informations peuvent souvent être représentées sous forme de cartes ou peuvent posséder des caractéristiques spatiales. "*Des cartes ou des schémas seront utilisés, le cas échéant, pour compléter ou remplacer les tableaux ou le texte des publications d'information aéronautique*", selon l'annexe 15 de l'OACI [138]. Il existe d'autres informations à mettre à disposition des opérateurs, détaillées dans l'Annexe 15. Par exemple, le Bulletin d'information prévient qui est un exposé de l'information NOTAM en vigueur ayant de l'importance pour l'exploitation, établi avant un vol.

Dans le respect des standards internationaux et afin que la coopération et l'utilisation par tous les exploitants soient possibles, chaque pays membre a obligation de produire et maintenir des cartes aéronautiques [141]. En effet, la cartographie joue un rôle très important pour la sécurité de l'aviation. Les représentations cartographiques, qu'elles soient sur un support papier ou un support électronique, ne sont pas une fin en soit en aéronautique. Elles servent de facilitateur dont le but principal est le support à la sécurité [194]. Pour l'OACI, des données de navigation à jour, complète, fiable, faisant autorité et disponible à tout moment sont nécessaires pour la sécurité des opérations. Les cartes aéronautiques ont été conçues dans cette optique, en plus de fournir l'information d'une manière condensée, coordonnée et facilement exploitable [141]. Les cartes sont utilisées lors de la préparation de mission et de l'exécution par les opérateurs, les compagnies aériennes et les pilotes ; pour la planification et la gestion du trafic aérien par les contrôleurs ; pour l'analyse du système de l'aviation en général, grâce aux cartes thématiques et à la représentation des flux. Les principales cartes recommandées par l'OACI sont les cartes d'aérodrome/d'hélistation, les cartes des mouvements à la surface de l'aérodrome, les

cartes d'obstacles d'aérodrome, les cartes de terrain et d'obstacles d'aérodrome, les cartes de stationnement et d'accostage d'aéronef, les cartes régionales, les cartes d'altitude minimale pour le vol sous surveillance ATC, les cartes d'approche aux instruments, les cartes topographiques pour approche de précision, les cartes d'arrivée normalisée aux instruments (STAR), les cartes de départ normalisé aux instruments (SID) et les cartes d'approche à vue.

La littérature en matière de cartes aéronautiques est rare [81]. Ovodas et Čes-nulevičius ont étudié l'optimisation des cartes de navigation pour les militaires et ont proposé de nouveaux symboles pour réduire la charge mentale lors de leur utilisation [211]. Ils ont formalisé une méthode de calcul de la surcharge mentale lors de l'utilisation des cartes aéronautiques. Dietzsch et al. ont listé les sources, les technologies et les produits relatifs à la cartographie aéronautique [81]. Leur état de l'art affirme que les clients principaux de la cartographie aéronautique sont maintenant les systèmes et que ce ne sont plus les humains qui manipulent et utilisent directement les cartes. Ils identifient que les couches d'informations devront être mises à la disposition des clients pour leur exploitation en passant par le web car les systèmes seront de plus en plus connectés, que le traitement et les informations devront être certifiés pour avoir une assurance du niveau de sécurité et que la ligne de production des produits cartographiques destinés à l'aviation doit être plus rapide, avec des données plus précises et plus accessibles. Les travaux plus récents portent sur l'utilisation des cartes comme support aux activités aéronautiques comme l'utilisation d'une carte en 3D pour repérer et identifier les phénomènes météorologiques dangereux [258] ou la conception de nouvelles interactions afin de permettre aux contrôleurs aériens d'intégrer le trafic de gros drones sur leur interface de contrôle, elle-même étant déjà une représentation cartographique de la situation en vol [101] ou dans le cadre de l'UTM [44].

C Modèle conceptuel complet de la demande d'autorisation en catégorie d'exploitation spécifique

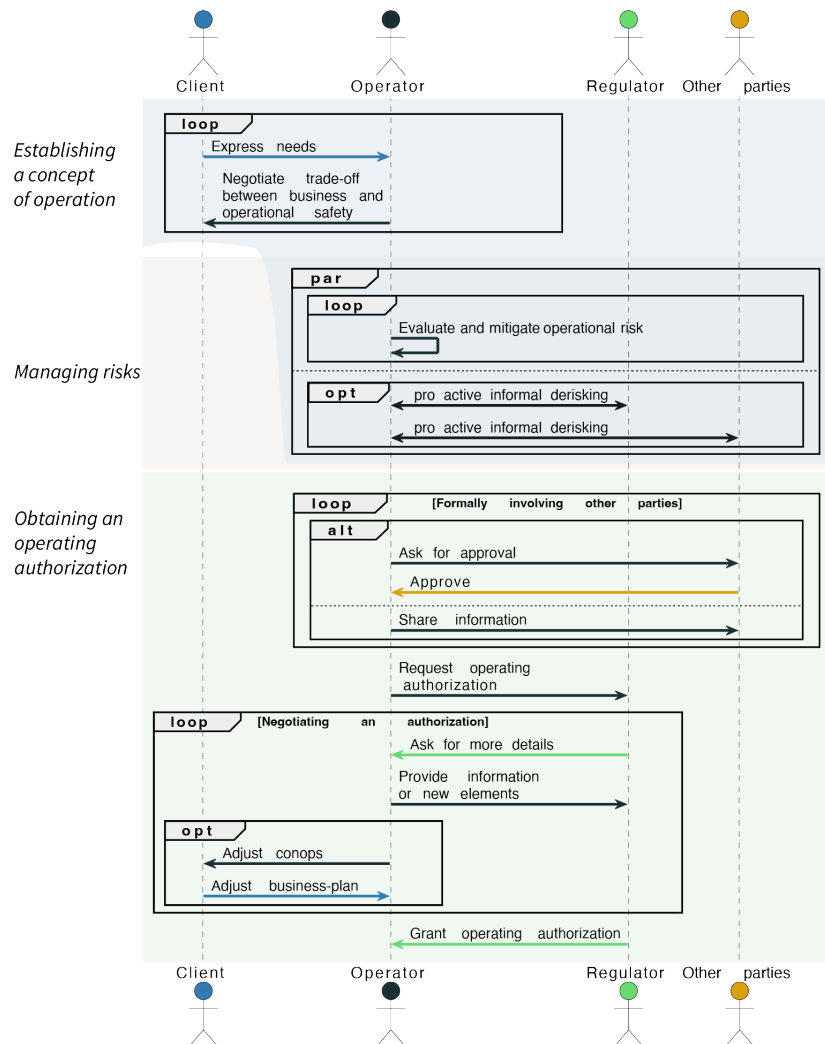


FIGURE 5 – Diagramme de séquence complet du processus de demande d'autorisation d'exploitation en catégorie spécifique

D Questionnaire de suivi

What do you think of the following recommendations:	I absolutely do not agree	I do not agree	Neutral – no opinion	I agree	I completely agree
RC1: Establish the concept of operation (mission goal, technical and regulatory feasibility) synchronously with the customer.	☐	☐	☐	☐	☐
RC2: Systematically use operational parameters to describe a mission.	☐	☐	☐	☐	☐
RC3: From the parameters of a mission, support the identification of the elements of the regulation concerning the operation.	☐	☐	☐	☐	☐
RC4: Support exploration of operational parameters and estimate their impact on mission safety.	☐	☐	☐	☐	☐
RC5: Develop usable tools supporting the production of reliable data from the regulator's perspective or the mitigation of unreliable data.	☐	☐	☐	☐	☐
RC6: Support representation and manipulation of operational parameters on maps.	☐	☐	☐	☐	☐
RC7: Exploit the concepts of editorial chains: allow version management, automate the inclusion of elements, the updating of links and the generation of required documents.	☐	☐	☐	☐	☐
RC8: Support early identification of third parties, protocols, and deadlines for required clearances.	☐	☐	☐	☐	☐
RC9: Enable awareness of the current status of the application among all stakeholders.	☐	☐	☐	☐	☐
RC10: Harmonize the representation of data and the presentation of documents between all authorization requests.	☐	☐	☐	☐	☐

Optional additional advice or optional clarification on RC1	
Optional additional advice or optional clarification on RC2	
Optional additional advice or optional clarification on RC3	
Optional additional advice or optional clarification on RC4	
Optional additional advice or optional clarification on RC5	
Optional additional advice or optional clarification on RC6	
Optional additional advice or optional clarification on RC7	
Optional additional advice or optional clarification on RC8	
Optional additional advice or optional clarification on RC9	
Optional additional advice or optional clarification on RC10	

FIGURE 6 – Questions évaluant l'accord sur les recommandations

Prioritize each of the recommendations	Unnecessary	Low priority	Medium priority	Neutral - No opinion	High Priority	Very High Priority	The most important one if any
RC1: Establish the concept of operation (mission goal, technical and regulatory feasibility) synchronously with the customer.	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
RC2: Systematically use operational parameters to describe a mission.	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
RC3: From the parameters of a mission, support the identification of the elements of the regulation concerning the operation.	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
RC4: Support exploration of operational parameters and estimate their impact on mission safety.	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
RC5: Develop usable tools supporting the production of reliable data from the regulator's perspective or the mitigation of unreliable data.	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
RC6: Support representation and manipulation of operational parameters on maps.	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
RC7: Exploit the concepts of editorial chains: allow version management, automate the inclusion of elements, the updating of links and the generation of required documents.	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
RC8: Support early identification of third parties, protocols, and deadlines for required clearances.	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
RC9: Enable awareness of the current status of the application among all stakeholders.	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
RC10: Harmonize the representation of data and the presentation of documents between all authorization requests.	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
What recommendations do you think are missing?							
If you were to order all relevant recommendations, including those you would have proposed, in descending order of priority, separated by a comma, how would you rank them?							
	The model is not correct at all	The model is not correct enough	Neutral – no opinion	The model is correct overall	The model is quite correct and sufficiently representative		
In your opinion, is the model correct and representative of reality?	☐	☐	☐	☐	☐		
Additional notice or clarification of the application process model							

FIGURE 7 – Questions évaluant la priorité entre les recommandations et le degré d'exactitude du modèle conceptuel de la demande d'autorisation en catégorie d'exploitation spécifique