

Drone "humanitaire" : état de l'art et réflexions

Ludovic Apvrille¹, Tullio Tanzi¹, Yves Roudier² et Jean-Luc Dugelay²

1: Institut Mines-Telecom, Telecom ParisTech, LTCI CNRS - France

{prenom.nom}@telecom-paristech.fr

2: EURECOM, Biot – France

{prenom.nom}@eurecom.fr

Résumé

L'information joue un rôle clé dans la gestion des catastrophes naturelles et l'organisation des secours. Les drones légers actuels peuvent aider à améliorer l'évaluation de la situation. Ils soulagent les équipes de secours des tâches de collecte de données, qui restent un processus long. Dans le même temps, ces drones peuvent prendre part aux opérations de recherche grâce à leur autonomie et à leurs fonctions avancées de détection. Pour concrétiser cette vision, deux défis doivent être abordés. Le premier est d'atteindre une autonomie suffisante pour ces véhicules, tant en termes de navigation que d'interprétation des données détectées. La deuxième concerne la fiabilité de l'engin et sa robustesse face aux agressions d'origine accidentelles ou malveillantes. Cet article présente tout d'abord le potentiel des drones dans plusieurs scénarios humanitaires, puis quelques problèmes potentiels liés à de telles situations. Enfin, une architecture sécurisée de drones embarquée qui repose sur des protocoles cryptographiques et des capacités matérielles spécifiques est proposée.

Mots-clés : UAV; drones; reconstruction 3D; sécurité; sûreté

Abstract

Information plays a key role in the management of natural disasters and relief organization. Current light UAVs can help improve the assessment of the situation. They relieve the rescue teams of data collection tasks, which remain a long process. At the same time, these drones can take part in search operations thanks to their autonomy and their advanced detection capabilities. To achieve this vision, two challenges must be addressed. The first is to achieve sufficient autonomy for these vehicles, both in terms of navigation and detected data interpretation. The second concerns the reliability of the equipment and its robustness against accidental or malicious of origin. This paper first presents the potential of UAVs in several humanitarian scenarios, then some potential problems related to such situations. Finally, an architecture secure embedded UAV based on cryptographic protocols and specific hardware capabilities is proposed.

Keywords: UAV; drones; 3D perception; security; safety

1 Introduction

Selon Guhar-Sapir et Hoyois [1], en 2012, les catastrophes d'origine naturelle (tremblements de terre, glissements de terrain et des phénomènes météorologiques violents tels que les cyclones tropicaux, les violentes tempêtes, les inondations) ont tué un total de 9 655 personnes et provoqué 124,5 millions de victimes, dans le monde entier. Bien que ces chiffres soient bien au-dessous des moyennes annuelles des périodes 2002-2011 (107 000 tuées et 268 millions de victimes), les dommages économiques ont subi une augmentation (143 milliards de dollars).

Lorsqu'une catastrophe naturelle se produit dans une zone peuplée, il est obligatoire d'organiser des opérations de gestion de catastrophe rapidement et efficacement afin d'aider la population, afin de réduire le nombre de victimes et d'atténuer les conséquences économiques [1], [2], [3], [4]. Une organisation non optimale provoque des pertes supplémentaires et des retards dans le retour vers la situation normale¹.

Quelle que soit la taille de la collectivité ou la nature de la catastrophe, les responsables de gouvernements locaux sont chargés de superviser les trois phases du cycle de gestion des catastrophes : avant la catastrophe, l'intervention pendant et l'après-catastrophe. La gestion des urgences commence avec la recherche et le sauvetage et se poursuit avec la stabilisation de la situation globale de la catastrophe. À tout moment, les équipes de secours ont un besoin immédiat d'informations concernant les situations qu'ils ont à affronter : évolution de la situation, identification des rescapés, des zones critiques, accès aux camps de réfugiés, outils d'assistance divers, etc. Comme expliqué dans [3], l'utilisation des nouvelles technologies et nouvelles approches sont nécessaires pour une gestion plus efficace des risques, avant, pendant et après une crise potentielle. Chaque action, spécifique à chaque étape de la crise, doit être prise en compte. À cette fin, de nouveaux outils et méthodologies sont nécessaires pour mieux gérer les situations de crise.

Nous présentons dans cet article quelques applications pour lesquelles une nouvelle génération de véhicules aériens sans pilote (UAV), aussi appelés drones, peut contribuer à améliorer le travail des équipes d'intervention. En particulier, les drones, qui sont assez bon marchés par rapport aux satellites et avions

¹ <http://www.un-spider.org/>

traditionnels, peuvent aider à étendre la portée des équipes de secours et de les aider à explorer la zone d'intervention de manière plus systématique. Nous présenterons également les défis importants qui doivent être abordés en termes de navigation et autonomie de détection, ainsi que la fiabilité en termes de sécurité et sûreté, afin de permettre l'utilisation transparente de ces drones par des non-spécialistes de la robotique.

2 Applications potentielles des drones

2.1 Communications et coordination

Dans toutes les catastrophes, une des premières actions est de mettre en place une cellule de coordination. Pour les risques majeurs, cela comprend les ministères nationaux, la défense civile, administrations régionales et locales, les administrations non gouvernementales impliquées dans la gestion des catastrophes, experts, états-majors de crise, une chaîne de commandement, une chaîne d'information, etc. Au cours d'un tel événement, maintenir un lien de communication avec les différents acteurs de la réponse d'une part, et avec les victimes d'autre part, est crucial. Malheureusement, lorsque l'infrastructure de communication a été touchée, les équipes de secours s'appuient essentiellement sur les réseaux radios ou les communications par satellite. Ce lien reste indispensable, même en présence de circonstances de black-out, comme par exemple une panne d'électricité majeure dans un réseau (électricité, eau, etc.).

Les drones peuvent étendre les capacités de communication car ils peuvent être déployés comme relais de radio mobile. Ils peuvent également transmettre des messages par la mise en œuvre de réseau tolérant (DTN), au cours de leurs activités normales, en reliant les acteurs concernés. Bien sûr, la mise en œuvre d'un UAV génère ses propres besoins de communication et un centre de contrôle destiné aux drones doit être assuré par des unités mobiles sur site ou par la cellule chargée des secours.

Les données acquises et les résultats de calculs ou d'évaluation nécessitent un réseau de communication, car ils sont produits pour la coordination des opérations de secours. Le drone doit établir les priorités opérationnelles pour décider quelles données, prétraitées ou pas, nécessitent une communication au fil de l'acquisition, et quelles données seront produites en fin de mission.

Les communications entre le centre de contrôle et les drones doivent être sécurisées afin d'éviter toute interférence indésirable pour empêcher les accès non autorisés aux données sensibles et détecter des anomalies de communication (écrasement de l'UAV, brouillage radio, etc.).

2.2 Reconnaissance terrain

La détection et le suivi de l'impact des catastrophes naturelles sur le terrain sont principalement produites par des techniques spatiales et aéroportées, en s'appuyant sur des instruments optiques (visible et IR) et radiométriques (Radar). Les instruments optiques

présentent des limitations dues, aux observations de nuit ou en présence de couverture nuageuse. Les observations radio sont disponibles quelques soient les conditions atmosphériques et restent insensible aux intempéries. Elles sont donc particulièrement utiles pendant la phase de "réponse" du cycle de gestion des catastrophes durant laquelle les informations doivent être livrées avec retard aussi court que possible [5], [6], [7].

Les drones peuvent être facilement équipés avec différents types de capteurs optiques ou radiométriques selon leur mission. Leur altitude permet d'observer sous une couverture nuageuse. Enfin, les équipes de recherche et de sauvetage peuvent transporter des drones et les déployer, par exemple pour explorer certaines zones d'inondation afin de trouver un chemin praticable pour rejoindre les sinistrés. Les drones étendent la gamme d'exploration des équipes de secours tout en améliorant leur sécurité dans les zones susceptibles de révéler dangereuses pour leur propre sécurité. Le mini drone de la société suisse "senseFly" a montré des capacités de cartographie automatisée et comment améliorer l'intervention à la suite du tremblement de terre Haïti 2010, en permettant aux autorités de dessiner rapidement des cartes de zones dévastées [8].

Le développement et l'intégration des caractéristiques d'autonomie du drone sont essentielles pour cette application. En effet, le drone est susceptible d'être dans des situations où il ne pourra pas communiquer avec le centre de contrôle, soit en raison d'interférences, sporadiquement ou prolongée, par exemple dans le cas d'exploration du terrain derrière des obstacles ou au-delà de la portée des relais radio.

L'accès aux données captées par l'engin doit être contrôlé. Cela concerne les communications en vol, mais aussi celles stockées dans l'appareil. En effet, en cas de collision ou de pannes, ces données ne doivent pas être récupérables par un tiers. Ces données peuvent présenter des aspects commerciaux ou avoir des implications politiques. Elles ne doivent pas être détournées par des tiers et aboutir à une entrave pour les opérations de secours.

2.3 Opérations de recherche

De même que pour la reconnaissance du terrain, des satellites et des avions sont actuellement utilisés pour localiser et dénombrer les victimes, avec la même problématique concernant la météo, les conditions diurnes nocturnes, ainsi que la disponibilité.

L'autonomie joue également un rôle clé à ce niveau. Une gamme appropriée de détecteurs doit être combinés afin de distinguer les êtres humains des objets inanimés, surtout dans le cas où les victimes sont enterrées sous les décombres et donc, ne peuvent pas être détectées avec des instruments optiques. Le système doit être également en mesure de distinguer les victimes des équipes de secours. Les algorithmes doivent être adaptés à la détection et le suivi des victimes et les groupes de victimes afin d'anticiper leurs mouvements et de fournir des informations comme, par exemple, une évaluation de leur état de santé.

Les questions de sécurité constituent une préoccupation majeure. La basse altitude et l'autonomie de navigation d'un UAV peuvent potentiellement causer des blessures aux victimes à proximité, ou encore aux sauveteurs en cas d'accident par exemple. Cela signifie que les drones doivent englober cette dimension dès la phase de leur conception et intégrer des mécanismes de sécurité. Il est, par exemple possible de faire fonctionner l'engin en mode dégradé avec moins moteurs afin d'atterrir en toute sécurité, ou déclencher un parachute de secours pour réduire la vitesse de l'impact due au retour au sol imprévu. La sécurité des données stockées à bord des drones est particulièrement sensible en ce qui concerne la confidentialité des victimes. Il y a eu des situations dans le passé où les images des victimes identifiables ont fait la une des journaux sans leur accord.

Le déploiement de drones pour de telles applications constitue aussi des défis sociétaux. L'apparition d'un drone peut être terrifiante pour une victime non avertie, ce qui peut réduire l'efficacité des opérations de détection. En revanche, des victimes peuvent ne pas remarquer les drones volant à plus haute altitude et donc ne pas signaler leur position comme ils le feraient pour un aéronef. De nouvelles normes devront probablement être définies à cet égard.

2.4 Données de détection et de traitement

Des travaux antérieurs avec des spécialistes (Protection civile, MSF², ICRC³, etc.) nous ont permis de formaliser trois besoins essentiels pour les équipes de sauvetage. La question fondamentale s'articule autour de l'assistance aux victimes dans les plus brefs délais. Pour atteindre cet objectif, il est nécessaire (1) de détecter les gens touchés par l'événement, mais aussi (2) d'identifier les accès possibles (p. ex., routes sûres, chemins, terrain possible) à la zone sinistrée et aux victimes. Ces opérations ne sont pas instantanées, et il est également nécessaire (3) de procéder à une évaluation continue de l'évolution de la situation dans la zone touchée. Dans cette phase, il est par exemple important d'informer et de rassurer les victimes. L'efficacité de ces opérations dépend de la vitesse et la précision à laquelle ils peuvent être effectués. Nous présentons trois catégories de charges utiles et leurs capacités de traitement de données connexes, pour illustrer l'intérêt de cette technologie pour relever les défis ci-dessus.

2.5 Exploration systématique du terrain

Une première classe de charges utiles de détection se rapporte à la couverture systématique du terrain afin d'effectuer la cartographie "rapide" de la zone de recherche. L'urgence nécessite généralement de suivre l'évolution de la situation au fil du temps. Si l'on dispose d'informations à haute résolution, il est facile de produire une carte tactique thématique appropriée aux opérations de secours. L'intérêt de ces cartes pour aider à la décision est très dépendant du capteur utilisé. Par exemple, le "*light detection and ranging*" (LIDAR) est une technologie qui utilise un laser à impulsions pour générer de grandes quantités de données sur la

disposition physique des caractéristiques de terrain. L'instrument déclenche de rapides impulsions lumineuses dont on mesure le temps de vol. Parce que la lumière se déplace à une vitesse constante et connue, on peut alors calculer la distance entre le capteur et la cible avec une grande précision.

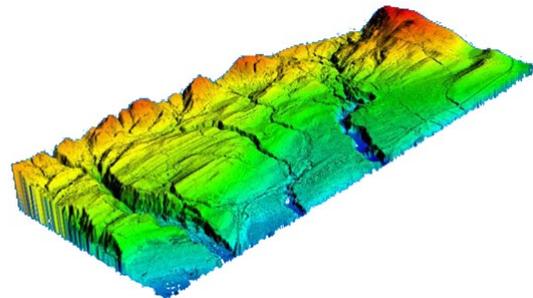


Figure 1 : Cartographie LIDAR

En répétant le processus, on produit une image complexe du terrain. Avec cette méthode, nous pouvons obtenir des modèles numériques de terrain (MNT) permettant un vaste ensemble d'analyse (voir figure 1).

2.6 Détection et classification automatique

Une deuxième classe de charges utiles a pour objectif la détection des victimes et leur classification. Au niveau du drone, cela implique des capacités avancées de détection. La simple détection de personnes n'est pas suffisante. En effet, la quantification est une information importante pour les organisations qui gèrent la catastrophe. Il permet le dimensionnement des aspects logistiques (tentes, nourriture, personnel médical, etc.). Il est donc nécessaire, lors de la détection, de mettre en œuvre une phase de reconnaissance (signature) afin de ne pas compter la même victime plusieurs fois. Un autre problème reste la discrimination entre les victimes et les secouristes (voir figure 2). Un drone devra, par exemple, identifier les groupes de personnes handicapées et déterminer s'ils sont adultes ou enfants. Cette distinction est importante car le soutien que les équipes de secours doivent fournir diffère fortement en fonction de la population à laquelle il s'adresse. La surveillance et le suivi d'un groupe spécifique est aussi intéressant pour estimer leur vitesse et anticiper leur position attendue dans le temps. Dans tous les cas, cette détection et ce suivi doivent être conforme aux politiques éthiques internationales et locales.

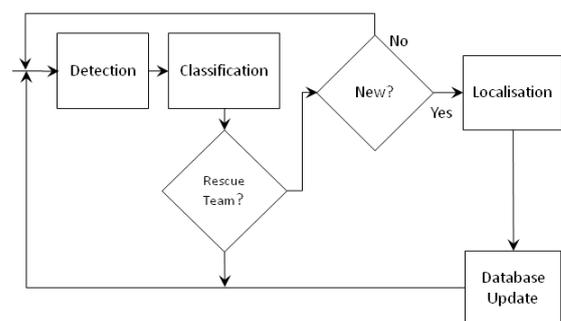


Figure 2 : Cycle de détection

² MSF : Médecins Sans Frontières.

³ ICRC: International Committee of the Red Cross.

2.7 Fusion de données

La fusion entre des données optiques (visible et infrarouge) et les données Radar peuvent également permettre l'extraction d'informations pertinentes pour l'aide à la décision (voir Figure 3).

Une autre approche non conventionnelle est destinée à améliorer la recherche de victimes ensevelies. L'idée est de chercher des émissions électromagnétiques émanant de téléphones portables ou d'autres objets connectés, en faisant une hypothèse de proximité entre l'objet et son possesseur. L'objectif est d'identifier la position dans les décombres où les équipes de secours sont plus susceptibles de trouver des victimes. Les équipes de secours sont donc guidées vers les emplacements les plus probables des victimes. La détection des objets connectés personnels constitue un nouveau moyen pour détecter les victimes enterrées après un tremblement de terre. En particulier, les drones peuvent intégrer plusieurs antennes imprimées pour prendre en compte les diverses gammes de fréquences de ces objets connectés. Cette solution destinée à détecter et cartographier la position des victimes nécessite de produire une image du sol à l'aide d'une antenne portée par un drone volant à une altitude très basse et en suivi de terrain.

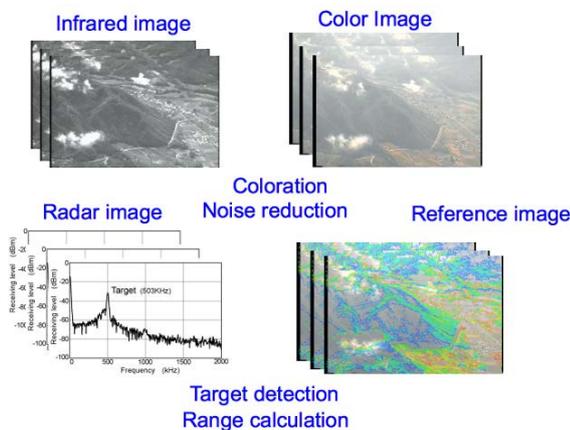


Figure 3 : Fusion de données optiques, radar et IR [22]

Ces traitements sont maintenant possibles grâce à l'augmentation de la vitesse des processeurs, de la plus faible consommation d'énergie des composants actifs y compris RF et de la plus grande capacité de mémoire de stockage dans un plus petit volume, ce qui est un facteur important pour les équipements embarqués. Le système de capteurs embarqués devra être multi-bande, pour ne négliger aucune source de rayonnement, disposer d'une forte directivité, afin de cibler précisément la source d'une émission et avoir un faible poids.

Deux approches peuvent être adoptées. L'approche "statique" va consister à concevoir une antenne dont la directivité, réglage de gain et poids seront optimaux selon les capacités de l'engin. Le drone sera ainsi en mesure de détecter une émission EM en étant en position verticale. Il peut alors enregistrer et transmettre les coordonnées identifiées vers un centre de coordination. En revanche, l'approche "active", permettra, en utilisant la formation de voie électronique, de couvrir une plus large zone géographique en un seul

passage. Ses composants électroniques actifs balayent un secteur angulaire autour de la verticale, dans un plan perpendiculaire à son déplacement. En cas de détection, le drone transmettra ses coordonnées de vol, ainsi que l'angle d'arrivée du signal. On retrouve ici l'esprit d'antennes 2D à synthèse d'ouverture, mais dans une approche purement écoute.

La prise en charge ces scénarios nécessite évidemment un vol autonome et la compréhension de l'environnement.

3 Drone humanitaire : architecture

En raison des conditions opérationnelles des recherches, les équipes de secours ne peuvent se permettre que de transporter des drones légers et compacts. Les drones plus industriels, qui disposent d'un grand nombre de systèmes de soutien, ne correspondent pas à ces exigences. Un drone humanitaire devra donc s'appuyer sur un équipement développé spécifiquement et disposer de beaucoup d'autonomie.

3.1 Présentation de l'existant

La figure 4 présente l'architecture généralement utilisée par les modèles actuels de drones. Un contrôleur de vol exécute une tâche automatisée de stabilisation qui filtre les commandes transmises par le pilote via la télécommande. La taille et le poids des équipements électroniques étant décroissant, les drones peuvent emporter des charges utiles de plus en plus performantes.

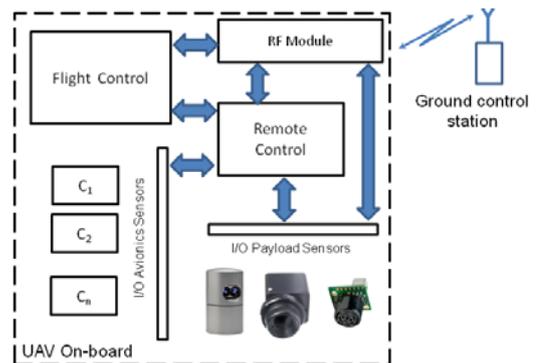


Figure 4 : Architecture classique

Le drone fournit souvent un capteur optique basé sur un ou plusieurs appareils photo. En plus des données de contrôle qui sont envoyées par le biais de la liaison de télécommande radio, les données issues des capteurs de charge utile sont généralement envoyées vers le pilote via un module dédié radio (RF). Ces systèmes sont utilisables pour le vol en immersion (FPV) et peuvent également être complétés par des données de télémétrie.

Certains drones disposent également d'une forme embryonnaire d'autonomie de navigation par GPS, le "waypoint routage". Les industriels commencent à développer des drones autonomes utilisant ces techniques, comme le senseFly [8]. Cependant les caractéristiques d'autonomie nécessaires pour

l'intervention dans le contexte humanitaire ne sont pas encore disponibles et les architectures classiques ne supportent pas ces exigences de fiabilité.

3.2 Architecture proposée

La figure 5 présente l'architecture que nous développons actuellement. Un contrôleur de vol implémente un contrôle autonome du système. Cela concerne les mesures à prendre dans des conditions normales de vol. Il s'agit de mission de planification grâce à la détermination des points d'intérêt, du type de capteurs nécessaires pour acquérir des données et de leurs paramètres, etc.

Un périphérique dédié aux situations d'urgence peut prendre la main sur le contrôleur de vol si l'engin sort de son enveloppe de vol. Par exemple, des changements brusques des conditions environnementales, la perte partielle de la sustentation, une diminution significative de l'énergie électrique, etc. peuvent nécessiter un atterrissage immédiat, ou encore le déclenchement du parachute d'urgence.

Le système de commande à distance permet une mise à jour des caractéristiques de la mission. Il permet également à un opérateur humain de prendre en mode manuel le fonctionnement de l'engin. Le système énergétique assume la gestion et l'optimisation de la capacité électrique. Il effectue une évaluation continue du "point de non retour" selon les conditions de la mission. Il peut demander au contrôleur de modifier son plan de vol (retour au point de départ, atterrissage d'urgence, etc.) afin de rester dans une plage sûre de pilotage.

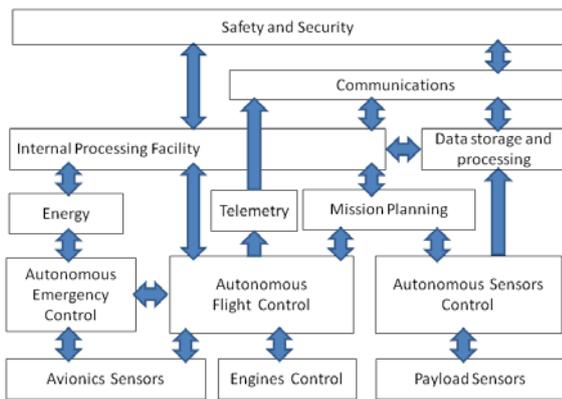


Figure 5 : Architecture proposée

4 Autonomie

Pour tous les scénarios que nous avons décrits dans les sections précédentes, les drones doivent être presque entièrement autonomes dans leur mission et dans vol (navigation autonome). Le fonctionnement du drone doit être accessible à des non-spécialistes en pilotage ou en robotique. En particulier, la navigation autonome doit être capable d'évoluer dans les zones sinistrées dont topographie du terrain peut être très complexe. Cela inclut la capacité autonome de voler près du sol tout en identifiant les obstacles. Le reste de cette section se concentre sur deux questions: (i) les

technologies pour la réalisation de navigation autonome et (ii) les technologies pour l'identification des victimes. Les contributions dans les deux domaines ont été développées par notre équipe dans le cadre du projet drone4u [9].

4.1 Navigation autonome

Les techniques de navigation autonome varient selon l'environnement de l'engin. La navigation intérieure est globalement plus facile qu'en plein air. Les difficultés liées aux intempéries comme la pluie et le vent n'existent pas. En outre, le drone peut connaître la carte de l'édifice qu'il explore et la nature des objets qu'il est susceptible de rencontrer. Nous pouvons aussi envisager l'utilisation de caméras RGB-D, qui est souvent impossible en plein air. Les principales difficultés de la navigation intérieure se situent dans des collisions potentielles avec les personnes, portes, ainsi que l'espace limité pour évoluer.

Dans ce contexte, la navigation exige une intelligence embarquée. Il faut, notamment, être capable de voler près du sol – ce dernier étant potentiellement chaotique - tout en reconnaissant automatiquement les obstacles dans la trajectoire avec très peu, ou aucune action, de l'opérateur du drone. Dans des travaux antérieurs, nous avons développé des fonctions de navigation autonomes en s'appuyant sur les (i) la définition et la mise en œuvre des manœuvres de vol spécial (contrôle avancé) et (ii) la définition et mise en œuvre des algorithmes d'analyse d'image afin de reconstituer l'environnement 3D ou pour suivre les informations, les objets ou personnes [10], [11].

Deux techniques ont été ainsi définies pour la perception 3D. Ces techniques ont été introduites afin de reconstituer l'environnement 3D d'un engin télé-piloté en utilisant qu'une seule caméra frontale (vision monoculaire).

La reconstruction 3D éparsée peut être utilisée en continu pendant le vol régulier et est donc notre méthode préférée de perception. On obtient généralement les emplacements spatiaux de quelques centaines de points par image, comme le montre les figures 6 et 7. La précision dépend en grande partie des mouvements du drone : les mouvements verticaux et latéraux sont particulièrement bénéfiques, c'est pourquoi notre stratégie de contrôle associé superpose une oscillation dans ces directions, créant par la présente une trajectoire de vol en tire-bouchon (*corkscrew shaped flight trajectory*). La technique de vol en tire-bouchon est décrite dans [12].

La reconstruction 3D Dense peut également fournir une distance estimée pour la plupart des pixels d'une image, mais exige en retour un contrôle de vol exclusif pour créer virtuellement une caméra stéréo verticale grâce à un changement d'altitude (voir Figure 8). Parce que le vol régulier doit être interrompu pendant cette manœuvre, les résultats sont denses dans l'espace, mais épars dans le temps.

Plus d'informations sur ces deux techniques sont disponibles dans [10]. La vidéo accessible à l'adresse <http://drone4u.telecom-paristech.fr> démontre aussi ces techniques de vol dans différentes conditions.

4.2 Détection des personnes



Figure 6 : Reconstitutions 3D éparses : les lignes bleues/violettes montrent des vecteurs de flot optique cohérent/en conflit avec le mouvement de la caméra. Un point de couleur représente sa distance longitudinale - rouge jusqu'à 1 m, cyan pour 10 m et plus. Un plus grand cercle vert marque la direction de vol.



Figure 7 : Reconstitutions 3D clairsemées imparfaites : les difficultés dues à l'éclairage causent des estimations erronées des mouvements de caméra et de distances des points 3D.

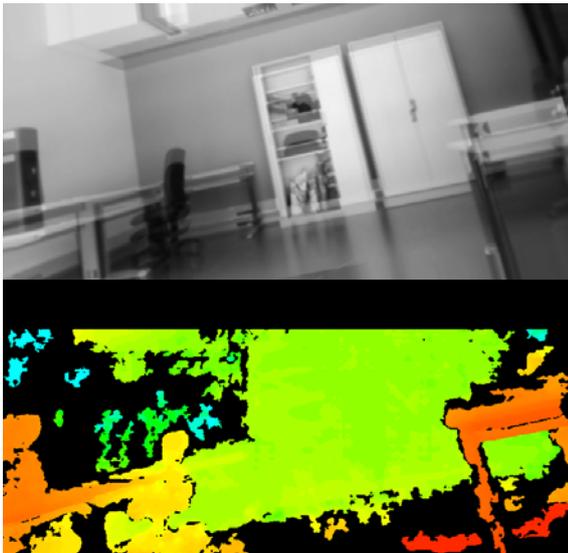


Figure 8 : Résultats de la reconstruction 3D dense : les images rectifiées superposées avant et après le changement de hauteur visualisent la précision du mouvement estimée de la caméra (en haut). Toute reconstruction standard de la distance, e. g. [13], est utilisable sans modification (en bas).

Une question importante dans les opérations de secours est la détection des victimes de la catastrophe. Nous proposons les techniques suivantes afin de détecter correctement les victimes. Deux niveaux d'identification doivent être atteints, dont les objectifs sont clairement différents.

L'identification des victimes individuelles. Le drone doit être en mesure d'obtenir la localisation précise des individus et de les suivre. Ainsi, lorsqu'on veut identifier une personne, la première tâche à effectuer est d'évaluer si cette personne a déjà été rencontrée dans le passé. Le chemin d'accès de l'individu doit donc être stocké (#id, position, temps). Grâce à ces informations et selon le contexte de la catastrophe, le déplacement peut être classé comme normal ou suspect (mauvaise direction pour atteindre les installations de sécurité, trop lent, etc.) et contribuer ainsi à adapter la stratégie ou à déterminer les priorités, les équipes de sauvetage.

Identifier les groupes de victimes. Dans le cas d'un groupe, il est nécessaire d'évaluer sa densité, le mouvement global et son évolution en termes de nombre de personnes faisant partie du groupe [24]. Suivre une personne en particulier peut se faire en réutilisant ce qui a été proposé par Dantcheva *et al.* [14]. Les principaux paramètres utilisés sont la taille des personnes (déterminée par traitement vidéo) et des couleurs de leurs vêtements afin d'établir une signature visuelle et ce qui lui permet de suivre qui a donné le groupe.

Des techniques de traitement d'image sous-jacentes sont assez connues et proviennent du domaine de la vidéosurveillance : l'histogramme des gradients orientés sont des caractéristiques classiques pour identifier un volume englobant autour des personnes en vidéo surveillance classique. Ces techniques n'ont pas encore été évaluées dans le cadre des drones et devront sans doute être adaptés à ce contexte.

5 Fiabilité, sûreté et sécurité

Les contraintes juridiques et éthiques découlent des risques potentiels encourus par l'utilisation d'un drone en ce qui concerne les victimes et les sauveteurs. Par exemple, un accident de drone est susceptible d'entraîner des dommages et de blesser les personnes. Le respect de la vie privée nécessite que toute information acquises lors d'une catastrophe soit contrôlée. Satisfaire ces contraintes nécessite de prendre en compte les risques lié à la tolérance aux pannes (comme par exemple dans le cas de la violation des délais en temps réel des tâches critiques pour la sécurité) et de la sécurité (piratage de données de télédétection, détournement de drone, etc.) et de les prévenir par des contre-mesures adéquates. Atténuer ou prévenir ces risques implique l'établissement de multiples mécanismes de sécurité dans les composants aussi bien que dans la conception architecturale dans l'ensemble, que nous détaillons ci-dessous.

5.1 Communications

La sécurisation des communications exige en premier lieu d'empêcher tout accès non autorisé aux données de brutes ou prétraitées stockées ou envoyées par le

drone vers le centre de contrôle. Les données stockées dans l'engin devront également être protégées afin d'empêcher leur exploitation si le drone est détourné pour une raison quelconque. Ces deux objectifs sont exécutés simultanément par l'intermédiaire de chiffrement de contenu. En outre, la source des messages (UAV ou contrôle center) doit être authentifié et l'intégrité des messages devra être vérifiée, afin d'empêcher :

- l'injection de fausses données dans le système et d'obtenir par exemple un avantage des opérations de sauvetage ;
- l'injection de fausses commandes et prendre le contrôle de l'UAV ou frauduleusement des accès à des données stockées. Ces attaques peuvent entraîner des risques graves en ce qui concerne la sécurité des vols par exemple.

Étant donné que la plupart des communications s'appuie sur différents modules existants de communication axée sur la radio, ces mécanismes de sécurité devront probablement être installés à une couche d'adaptation en interface des fonctionnalités de communication. Les contre-mesures de sécurité peuvent également impliquer des modifications de la télécommande afin d'authentifier les commandes de vol transmises au drone.

La disponibilité d'un système de navigation autonome doit également prendre en compte des conditions de communication qu'on peut prévoir difficiles (perturbations) entre le drone et le centre de contrôle. Ces perturbations sont notamment dues à la faible altitude et aux obstacles avoisinants, voire même à l'exploration de décombres.

5.2 Contrôle des données

Une façon courante de vérifier que les données d'un capteur (navigation ou de charge utile) n'ont pas été corrompues est d'effectuer un contrôle de vérification de ces données. Ces contrôles peuvent être faits sur les données des capteurs elles-mêmes. Des fonctions peuvent également porter sur les données produites par plusieurs capteurs et contrôler leur cohérence. En général, le système de stabilisation dépend de données émises par le gyroscope, par l'altimètre, etc. Cette fonction doit être utilisée dans notre architecture pour améliorer tant la sécurité de la fonction critique que pour limiter l'impact des attaques. La programmation logicielle des fonctions du drone devra probablement aussi mettre en œuvre des mécanismes de détection d'intrusion d'un surcoût limité. En particulier, il s'agit ici de s'assurer que des données manipulées ne peuvent être injectées dans certaines fonctions critiques et mener soit à une fuite de donnée, soit à des décisions autonomes erronées aux conséquences catastrophiques quant à la sécurité du vol. Les approches suivies seront soit statiques, par l'analyse des flux de données, soit dynamiques, notamment par des mécanismes d'instrumentation légers tels que ceux décrits dans [23]. Dans le premier cas, elles pourront être certifiées formellement, alors que le deuxième type d'approche devra être évalué par des tests de sécurité.

5.3 Architecture de sécurité

Le schéma d'architecture présenté par la figure 5 dispose d'un module de sécurité qui est chargé

d'effectuer toutes les opérations cryptographiques sur les communications entrantes et sortantes. Outre les nombreuses fonctions assurées par ce composant, un point particulièrement important reste la mise en place d'une séparation effective entre les fonctions de navigation critiques pour la sécurité et les autres sous-systèmes de l'engin.

Un sous-système particulièrement critique comprend les éléments relatifs aux communications qui pourraient être visés en priorités par des attaquants, par l'exploitation de failles de sécurité. Cela concerne notamment trois flux de communication qui peuvent être clairement identifiés sur la Figure 5 : (i) les données issues des capteurs de la charge utile qui sont stockées dans le drone. Ces données peuvent être traitées par le drone, ou traitées dans le centre de commande. Les résultats d'analyse sont consultés par les équipes de secours. (ii) Les données des capteurs avioniques sont gérées par le pilote automatique. Enfin (iii) les données télémétriques, qui sont envoyées dans le centre de contrôle. Cependant, ces flux peuvent interagir de manière subtile : par exemple, les données de la charge utile peuvent être utilisées par le contrôleur de vol afin de faire des contrôles de vraisemblance ; Outre les conséquences de sécurité peuvent entraîner ensuite attaques sur ces données.

Des moniteurs (ou observateurs) peuvent être utilisés afin de s'assurer que les interactions entre toutes les composants du drone sont saines, et ainsi filtrer les interactions indésirables. Une autre solution envisagée repose sur l'utilisation des techniques de virtualisation de l'exécution des différents services (charge-utile, vole, etc.) afin d'assurer une séparation logique forte au sein de mêmes composants physiques. L'introduction des cartes de système embarqué doté d'un grand nombre de noyaux comme le système Parallela (jusqu'à 64 cœurs) pourrait s'avérer intéressante soutenir une telle segmentation.

5.4 Contraintes temps-réel

D'un point de vue logiciel, la sécurité d'un drone dépend de nombreux critères habituels du génie logiciel, y compris la satisfaction de contraintes en temps réel, c'est-à-dire le respect des délais "durs". Le délais de traitement est particulièrement important dans le système de contrôle de vol où un non respect de ce délai peut conduire à la perte du drone.

La sécurité peut également avoir une incidence sur le fonctionnement pour deux raisons : tout d'abord, les attaques sur le système pourraient entraîner de la part des fonctions critiques de sécurité des réactions imprévues. Par exemple, une attaque par déni de service via le bus principal de l'engin pourrait retarder exagérément les ordres envoyés par le logiciel de commande destinés à des actionneurs (par exemple les moteurs). Deuxièmement, les mécanismes de sécurité eux-mêmes peuvent augmenter la charge système, lui faisant dépasser, par surcharge, un délai donné. Par exemple, le cryptage/décryptage d'un ordre de manœuvre de vol pourrait prendre beaucoup trop de temps et retarder l'exécution de la tâche en temps réel. Il est donc important d'évaluer l'impact des mécanismes de sécurité sur les fonctions liées à la sécurité. Des questions semblables ont été traitées dans d'autres

systèmes critiques pour la sécurité, par exemple, les systèmes automobiles [15].

6 Autres travaux

Les drones sont maintenant plus ou moins prêts pour un nombre croissant de domaines d'application civils, comme l'assistance quotidienne de personne, l'agriculture, l'industrie, etc. . Les tâches assignées à un drone par la République populaire de Chine (RPC) sont un exemple, parmi d'autres, de l'importance prise par cette technologie [9], [16]. Le MIT a aussi récemment présenté l'utilisation des drones pour l'agriculture, qu'il considère comme l'une des 10 percées technologiques de 2014 [17].

L'Union européenne réfléchit également à des mesures pour l'intégration progressive d'engins pilotés à distance (EPR) dans la zone civile de l'espace aérien [19]. Ainsi, la technologie EPR devrait bientôt conduire au développement d'un large éventail de services, surtout si ces derniers sont associés avec d'autres technologies, telles que le positionnement précis à l'aide de système de positionnement Galileo ou utilisés pour appuyer les autres technologies telles que les télécommunications en cas de catastrophe. La diversité des tâches à attribuer à l'EPR mènera aussi à rechercher des configurations différentes en ce qui concerne la charge utile embarquée. Pour donner un exemple, le GIX RPAS transporte un radar fonctionnant à 14 MHz double-fréquence et 35 MHz avec bandes respectives de 1 MHz et 4 MHz afin d'explorer la couverture de glace au pôle Sud [20]. Il est clair que la performance requise par ces demandes conduira à la conception de machines spécifiques et complexes, aux architectures innovantes.

7 Conclusion et travaux futurs

La conception de drones destinés aux interventions dans des conditions post-catastrophe humanitaire est un défi important [21]. Parmi tous les objets de hautes technologies de notre environnement moderne, les drones ont un potentiel impressionnant pour faciliter l'assistance après la catastrophe et pour étendre les capacités des équipes de secours, même si certains problèmes doivent être abordés et résolus.

Les capacités de vol croissantes des drones légers associés à l'utilisation de capteurs non conventionnels comme les Lidars, les caméras IR, etc., augmenteront fortement les capacités d'intervention des équipes de sauvetage opérationnel en ce qui concerne la détection des victimes, la cartographie de terrain, l'estimation des dommages, etc.

Cependant, les drones ne seront déployés avec succès dans les missions que si leur manipulation ne nécessite pas de compétences particulières et ne gêne pas les équipes de secours dans leurs tâches habituelles. Cette condition sine qua non explique notre orientation sur les questions de gestion de la mission et sur les capacités de vol autonome. Par exemple, les drones devraient être capables de gérer leur énergie en fonction de la situation (durée de la mission) tout en assurant le bon fonctionnement des systèmes de contrôle et de

commandement (autonomie décisionnelle en ce qui concerne les objectifs de la mission).

Des problèmes matériels et logiciels doivent évidemment être résolus : quelles architectures développer ? Quels algorithmes peuvent répondre aux exigences de vol en temps-réel ? Quelles contraintes pour la communication ? Quelles configurations de systèmes embarqués sont plus aptes à satisfaire les missions confiées ? Comment faire pour assurer un fonctionnement sûr et sécuritaire de ces dispositifs ? Nous avons esquissé plusieurs critères en ce qui concerne les drones destinés aux missions humanitaires. Toutes ces exigences entraîneront de nouvelles recherches en robotique, traitement d'image, architectures de systèmes embarqués, communications sans fil et sécurité, et nous travaillons à résoudre les défis recensés dans cet article.

Nous prévoyons également des défis en ce qui concerne l'interface homme-machine, et au-delà même, que l'utilisation des drones dans les opérations de secours aura des implications sociétales. Quels types d'interface homme-machine sont-ils les plus appropriés pour des victimes face à un drone ? Comment la présence de drones peut-elle aider à soulager les victimes dans des conditions critiques ou leur fournir des informations utiles ? Des réponses devront être apportées à ces questions et leur efficacité pourra uniquement être évaluée dans le déroulement d'opérations humanitaires futures.

8 Bibliographie succincte

- [1] D. Guha-Sapir, P. Hoyois, and R. Below, "Annual Disaster Statistical Review 2012: The Number and Trends," in CRED, Brussels, Belgium, 2013.
- [2] R. Chatterjee, B. Fruneau, J. Rudant, P. Roy, P. Frison, R. Lakhera, V. Dadhwal, and R. Saha, "Subsidence of Kolkata (Calcutta) City, India during the 1990s as observed from space by Differential Synthetic Aperture Radar Interferometry (D-InSAR) technique," *Remote Sensing of Environment*, vol. 102, no. 1-2, pp. 176–185, 2006.
- [3] T. Tanzi and P. Perrot, *Télécoms pour l'ingénierie du risque* (in French), editions hermès ed. Collection Technique et Scientifique des Télécoms, 2009.
- [4] T. Tanzi and F. Lefevre, "Radio Sciences and Disaster Management," *C.R. Physique*, vol. 11, pp. 114–224, 2010.
- [5] P. Wilkinson and D. Cole, "The Role of the Radio Sciences in the Disaster Management," *Radio Science Bulletin*, vol. 3358, pp. 45–51, 2010.
- [6] F. Lefevre and T. Tanzi, "International Union of Radio Science, International Council for Science (ICSU), Joint Board of Geospatial Information Societies (jBGIS)," in United Nations office for outer Space Affairs (OOSA), 2013.
- [7] T. Tanzi and F. Lefevre, "The Contribution of Radio Sciences to Disaster Management," in International Symposium on Geo-information for disaster management (Gi4DM 2011), Antalya, Turkey, 2011.
- [8] E. Ackerman, "Drone Adventures Uses UAVs to Help Make the World a Better Place," *IEEE Spectrum*, May 2013.

- [9] X. alfonsi, "Beijing Defines the Missions and Technological Innovations of his Current and Future UAVs (in French)," *Lettre confidentielles Asie 21 - Futuribles*, vol. 71, 2014.
- [10] B. Ranft, J.-L. Dugelay, and L. Apvrille, "3D Perception for Au- tonomous Navigation of a Low-Cost MAV using Minimal Landmarks," in *International Micro Air Vehicle Conference and Flight Competition (IMAV'2013)*, Toulouse, France, Sept 2013.
- [11] L. Apvrille, J.-L. Dugelay, and B. Ranft, "Indoor Autonomous Navi- gation of Low-Cost MAVs Using Landmarks and 3D Perception," in *OCOSS 2013*, Nice, France, Oct. 2013.
- [12] L. Apvrille, "Autonomous Navigation of Micro Drones," youtube.com/watch?v=tamYpmGvzRw, 2013.
- [13] H. Hirschmüller, "Stereo Processing by Semiglobal Matching and Mu- tual Information," *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 30, no. 2, pp. 328–341, 2008.
- [14] A. Dantcheva, J.-L. Dugelay, and P. Elia, "Person Recognition Using a Bag of Facial Soft Biometrics (BoFSB)," in *Multimedia Signal Processing (MMSP)*, 2010 IEEE International Workshop on. IEEE, 2010, pp. 511–516.
- [15] H. Schweppe, Y. Roudier, B. Weyl, L. Apvrille, and D. Scheuer- mann, "C2X Communication: Securing the Last Meter," in *The 4th IEEE International Symposium on Wireless Vehicular Communications: WIVEC2011*, San Francisco, USA, Sep. 2011.
- [16] X. alfonsi, "Chine : quand la sinistraton des RPAS et du soft power prétend légitimer la vision régionale de Pékin en mer de Chine du Sud (in French)," *Lettre confidentielles Asie 21 - Futuribles*, vol. 71, 2014.
- [17] C. Anderson, "Agricultural Drones: Relatively Cheap Drones with Ad- vanced Sensors and Imaging Capabilities are Giving Farmers new Ways to Increase Yields and Reduce Crop Damage," *MIT Technology Review*, <http://www.technologyreview.com/featuredstory/526491/agricultural- drones/>, 2014.
- [18] A. R. Jamieson, "ITU news." *ITU News commemorative edition*, vol. 3, April 2006.
- [19] E. commission, "A New Era for Aviation Opening the Aviation Market to the Civil Use of Remotely Piloted Aircraft Systems in a Safe and Sustainable Manner," in *Communication De La Commission Au Parlement Européen et Au Conseil. COM(2014)*, Brussels, Belgium, 2014.
- [20] C. L. et al., "UAS-Based Radar Sounding of the Pole Ice Sheets," *IEEE GRS Magazine*, March 2014.
- [21] P. Marks, "Smart Software Uses Drones to Plot Disaster Relief," *NewScientist*, Nov. 2013. Références
- [22] Tullio Jospheh Tanzi, Ludovic Apvrille, Jean-luc Dugelay, Claire Migliaccio, Julien Morel, Franck Guarnieri. Drone for Humanitarian Operations. Colloque de l'Institut Mines-Télécom, "Numérique : Grande échelle et complexité". Paris 25-26 mars 2014.
- [23] Hendrik Schweppe, Yves Roudier. Security and Privacy for In-Vehicle Networks, in *Proceedings of VCSC 2012, 1st IEEE SECON International Workshop on Vehicular Communications, Sensing,*
- [24.] Fradi, Hajer; Dugelay, Jean-Luc, "Low level crowd analysis using frame-wise normalized feature for people counting," *WIFS 2012, IEEE International Workshop on Information Forensics and Security*, December 2-5, 2012, Tenerife, Spain and Computing, 18th June, 2012, Seoul, Republic of Korea June 2012.