

nombre de fois. Les drones ont retenu l'attention des plus grosses entreprises. Frederick Smith, le fondateur et PDG de l'entreprise FedEx, spécialisée dans le transport international de fret, a évoqué le remplacement de sa flotte d'avions par des drones. En France, ERDF, le gestionnaire du réseau de distribution électrique, envisage d'en employer pour la surveillance des lignes.

Même le Congrès des États-Unis commence à admettre que les drones commerciaux vont se répandre. Dans une loi de 2012, il ordonnait l'établissement d'un « plan complet pour accélérer en toute sécurité l'intégration des systèmes civils d'aéronefs automatiques dans l'espace aérien national » d'ici 2015.

Malheureusement, les outils nécessaires à la gestion de ces robots télécommandés ont peu de chances d'être prêts à temps. Les drones étendent les responsabilités de l'Administration américaine de l'aviation au-delà de son rôle traditionnel, qui consiste à s'assurer que les avions restent à une distance respectable les uns des autres et résistent aux vicissitudes de la météo. À la suite des attaques du 11 septembre 2001, le rôle de cet organisme a été élargi aux problèmes de sécurité des avions, que l'arrivée d'essaims de drones dans le ciel multiplier.

Trois types de liaisons nécessaires

Le plus grand défi est la sécurisation des liaisons sans fil des drones. Pour manœuvrer un appareil, trois liaisons principales sont nécessaires : la première avec les satellites de géolocalisation (le système GPS), la deuxième avec les autres aéronefs (qui doivent être avertis des déplacements du drone), et la troisième avec le sol (pour le pilotage de l'engin). La perturbation de l'une de ces trois liaisons peut avoir des conséquences catastrophiques. Dans certains cas, on ne dispose pas de solution technique pour les sécuriser.

Le GPS est le pilier du système de navigation d'un drone, qui comprend aussi des capteurs de guidage inertiel, des magnétomètres, des altimètres et des caméras. Parmi ces dispositifs, seul le récepteur GPS permet une navigation de précision constante. En outre, il n'est pas touché par les conditions météorologiques, à l'inverse des caméras.

Contrairement au GPS militaire, la version civile est librement accessible et non chiffrée. Disponible sur les téléphones por-

■ LES AUTEURS



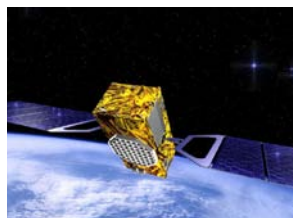
Kyle WESSON est doctorant en génie électrique et informatique à l'Université du Texas à Austin (États-Unis).



Todd HUMPHREYS est professeur de mécanique orbitale et directeur du Laboratoire de radio-navigation à l'Université du Texas.

Le guidage des drones par satellite

La géolocalisation par satellites (*ci-dessous, un satellite du système européen Galileo, qui devrait être opérationnel d'ici un ou deux ans*) est essentielle au pilotage des drones hors de la vue des opérateurs. En effet, lors d'un vol, la précision de la navigation fondée sur des cartes et des capteurs embarqués se dégrade au cours du temps. Un recalage périodique de la position est alors nécessaire. Toutes les procédures de sécurité, y compris celle qui force un drone à rentrer à sa base en cas de perte du signal de commande, utilisent un tel recalage, aujourd'hui par GPS.



ESA

tables ou les montres de sport, elle est très populaire, mais dépourvue de toute forme d'authentification, ce qui constitue une faiblesse dangereuse. On peut facilement remplacer le vrai signal par un faux (on parle de *spoofing*, ou de leurrage en français).

En juin 2012, dans la zone de tir de White Sands, au Nouveau-Mexique, notre équipe a montré que cela entraîne une menace pour les aéronefs sans pilote. Nous avons construit un dispositif de leurrage artisanal, qui a pris le contrôle d'un drone éloigné de 500 mètres. Notre dispositif émettait une imitation presque parfaite des signaux satellitaires qui relaient les coordonnées du drone jusqu'à lui. Incapable de distinguer entre le vrai et le faux signal, le drone s'est laissé guider par le plus intense, c'est-à-dire le nôtre.

Quand notre signal indiquait à tort au drone qu'il s'élevait verticalement, l'appareil descendait pour se maintenir à l'altitude programmée dans son système de pilotage automatique. Dès lors, il s'est rapproché dangereusement du sol. S'il ne s'est pas écrasé, c'est uniquement parce qu'un opérateur a fini par prendre le contrôle manuel de l'engin.

Le danger du leurrage est connu depuis plus d'une décennie. Le Département américain des transports l'a signalé dans un rapport de 2001, mais les décideurs et les fabricants d'appareils GPS n'en ont tenu compte que très récemment, pensant peut-être qu'une attaque était improbable. Les solutions techniques envisagées sont loin d'être prêtes. Certaines consistent à protéger les signaux GPS par crypto-tatouage (une signature numérique sécurisée qui identifie l'origine d'un signal et garantit le contenu de son message), mais elles ne pourront pas être implémentées avant plusieurs années. D'autres techniques se fondent sur des systèmes embarqués de supervision des mesures et de la navigation : ainsi, quand l'indication d'altitude donnée par le signal GPS n'est pas en accord avec les autres données (telle celles fournies par les altimètres et les caméras), ce signal n'est plus pris en compte. Cependant, ces techniques doivent encore faire leurs preuves.

Le leurrage n'est pas la seule menace qui pèse sur les drones dépendant des signaux GPS. Près de la surface de la Terre, ces signaux sont faibles et leur réception facile à bloquer : leur densité de flux (une mesure de la puissance du signal) équivaut à celle de la lumière émise par une ampoule

Dans le cas d'un brouillage intentionnel, on peut concevoir un dispositif bien plus

efficace pour perturber le système de navigation du drone. En mai 2012, des opérateurs sud-coréens ont perdu le contrôle d'un drone de reconnaissance de 150 kilogrammes, qui s'est écrasé sur sa station de contrôle au sol, tuant un ingénieur et blessant deux opérateurs. Si ces derniers ont sans doute commis un certain nombre d'erreurs, il est probable qu'un brouillage nord-coréen visant la Corée du Sud a déclenché la suite d'événements ayant conduit au crash. Comme cet incident

Le risque de collision avec un autre appareil compliquera encore l'accueil des drones dans l'espace aérien. Les pilotes classiques utilisent des données visuelles et radar pour détecter la présence d'autres aéronefs et éviter les collisions. Les drones n'en sont pas encore capables. Selon un

Les signaux radio utilisés pour piloter un drone comportent des failles de sécurité, exploitables par un pirate de l'air. En envoyant de faux signaux ou en brouillant les émissions légitimes, on peut faire dévier l'appareil de sa trajectoire et, par exemple, l'envoyer s'écraser au sol. Plusieurs actes criminels sont possibles.

Les opérateurs d'un drone le pilotent à l'aide de signaux radio émis par une station au sol, mais ces signaux peuvent être brouillés.

Signaux de contrôle

Signaux de leurrage

Bruit (brouillage)

Brouillage

Les signaux de navigation par GPS et d'autres signaux critiques pour le pilotage du drone peuvent être « bloqués ». Pour ce faire, le pirate émet du bruit dans les régions du spectre radio utilisées par ces émissions. Il n'existe aucune parade satisfaisante, les drones pouvant juste être programmés pour revenir à leur base en cas de perte de la liaison radio.

Satellites GPS

Signal de navigation par satellite

Signaux du transpondeur

- Émissions de leurrage et de brouillage

Les émissions d'un transpondeur qui avertissent les autres vols de la présence d'un appareil peuvent être falsifiées ou brouillées.

Leurrage

Un simple appareil électronique de poche peut émettre des signaux imitant ceux des satellites GPS ou des transpondeurs qui identifient les aéronefs. Ces fausses émissions peuvent dominer les vraies et faire dévier un drone de sa trajectoire. Pour se prémunir d'un tel leurrage, une technique consiste à chiffrer les signaux légitimes grâce à une signature numérique. Mais son déploiement prendra des années, et les autres techniques n'ont pas fait leurs preuves.

rapport de 2012 de la Cour des comptes américaine, «Aucune technologie déployée ne confère [aux aéronefs sans pilote] la capacité de détecter et d'éviter les aéronefs et les autres objets dans les airs» tout en satisfaisant aux réglementations aériennes.

Éviter les autres appareils est particulièrement difficile pour les petits drones, car ils ne peuvent pas embarquer les systèmes de radar existants, trop encombrants et gourmands en électricité. Les caméras en lumière visible et infrarouge offrent une alternative efficace, mais elles ne voient pas à travers les nuages.

À terme, une solution pourrait venir de l'ADS-B (*Automatic Dependent Surveillance-Broadcast*), un système développé à partir des années 1990. Il se fonde sur des «transpondeurs» embarqués, qui signalent toutes les secondes la position et la vitesse de l'appareil, et reçoivent des informations

équivalentes des aéronefs évoluant dans la même zone. D'ici 2020, tous les appareils volant dans l'espace aérien américain, petits ou gros, avec ou sans pilote, devront être équipés de transpondeurs ADS-B. Ainsi, les collisions pourront être évitées.

Comme le GPS civil, l'ADS-B a un talon d'Achille : ses émissions ne sont pas authentifiées et peuvent donc être contrefaites. Au début de son développement, la sécurité était une préoccupation mineure, car personne n'imaginait que l'on puisse diffuser de faux signaux. Aujourd'hui, il est facile et peu coûteux de leurrer ce système. En 2012, des chercheurs de l'Institut de technologie de l'Armée de l'air américaine, dans l'Ohio, ont montré que des attaques variées, fondées sur de faux signaux, peuvent être lancées depuis le sol ou les airs avec une antenne bon marché. De telles attaques, dites de «fausse injection», feraient par exemple

croire à un appareil qu'une collision est imminente.

On peut ainsi émettre des centaines de faux signaux ou empêcher la réception de messages légitimes. De faux signaux ADS-B seraient plus problématiques pour les petits drones que pour un avion doté d'un pilote embarqué. En effet, grâce au radar de bord, un pilote peut rapidement vérifier si la trajectoire de son appareil entraîne un risque de collision.

Une solution envisagée pour authentifier les sources des émissions est la multilatération, une technique consistant à localiser ces sources en mesurant les instants relatifs d'arrivée des signaux sur des récepteurs au sol, puis à relayer cette information jusqu'aux avions en vol. Mais cela suppose de mettre en place un système de géolocalisation différent du GPS (avec des récepteurs au sol au lieu de satellites

Les drones en Europe

Les États-Unis et Israël sont en avance en matière de drones militaires, grâce à leur retour d'expérience en opérations ou lors d'entraînements. Un marché s'y est développé dans les années 1990. L'Europe a utilisé beaucoup moins de drones de ce type (seuls quelques-uns ont servi à des observations au Kosovo, en Iraq et en Afghanistan) et son industrie aéronautique n'a pas bénéficié du marché militaire.

Cependant, les performances européennes sont comparables à celles des États-Unis et d'Israël dans le domaine des drones civils, pour lesquels les priorités sont différentes. Du côté militaire, l'efficacité prime, tandis que le risque d'accident est un paramètre essentiel dans les espaces aériens civils.

On sait aujourd'hui proposer des solutions individuelles à chaque problème identifié : perte de signal GPS pendant quelques minutes, perte de communications, risque de collision, pannes simples, etc. Mais les vols réels impliquent souvent de multiples combinaisons et enchaînements de ces éléments simples, face auxquels les systèmes actuels peinent à remplacer la réactivité de pilotes entraînés et présents à

bord. Il faut alors développer un système global et sécurisé de supervision du vol, où pourraient être programmés les paramètres propres à chaque mission et qui gèrerait les aléas et les défaillances.

C'est le sens des recherches menées par le réseau *Micro Air Vehicle Research Center* (Centre de recherche sur les micro-drones), à Toulouse, coordonné par l'Institut supérieur de l'aéronautique et de l'espace (ISAE) et regroupant un certain nombre d'autres organismes (ENAC, Onera, LAAS-CNRS, etc.). Y sont développés des systèmes de navigation combinant les données du GPS, d'accéléromètres, de caméras, de cartes, de détecteurs d'obstacle, de localisation relative, etc. De tels systèmes devraient

pouvoir détecter les incohérences entre les données introduites par les piratages décrits dans cet article. Diverses applications sont visées, telle l'inspection de grottes archéologiques ou le recueil de données météorologiques.

En attendant l'arrivée de ces systèmes sur le marché, les usages autorisés doivent être restreints, afin de simplifier les problèmes de sécurité rencontrés. En France, une réglementation pour les drones civils a été publiée en 2012. Elle interdit par exemple le survol des zones peuplées sans dépôt d'un dossier de sécurité – un lycéen a d'ailleurs été poursuivi par la justice en février 2014 pour avoir filmé la ville de Nancy avec un drone sans autorisation. Les usages permis se répartissent en quatre scénarios et doivent faire l'objet d'une demande d'autorisation spécifique. L'un de ces scénarios, par exemple, décrit le survol de zones inhabitées, à moins de 50 mètres du sol, dans un rayon d'un kilomètre et hors de la vue de l'opérateur ; il

concerne typiquement des applications agricoles.

Pour améliorer la fiabilité des drones, on devra aussi adapter la formation des opérateurs qui les dirigent. Ces appareils ont introduit une nouvelle façon de piloter, qui modifie en profondeur le partage des tâches entre hommes et systèmes, et donc le partage de responsabilité entre pilotes et concepteurs.

Ainsi, la technologie et la réglementation doivent évoluer de concert pour définir des applications des drones adaptées à leurs caractéristiques propres. Malgré leur manque de fiabilité, ces appareils ont de nombreux atouts : gamme de tailles variée, émissions sonores réduites pour les petits drones, pas de mise en danger de la vie des pilotes... Plus que leur coût (le retour d'expérience sur les drones militaires a montré que le coût d'exploitation reste élevé malgré l'absence de pilote à bord), ce sont ces atouts qui favoriseront leur déploiement.

– Patrick Fabiani

Directeur adjoint de la recherche, ISAE (SupAero & Ensica)