

# Rapport UIT-R SM.2486-1 (06/2024)

Série SM: Gestion du spectre

## Utilisation de drones commerciaux pour les activités de contrôle du spectre de l'UIT-R



## Avant-propos

Le rôle du Secteur des radiocommunications est d'assurer l'utilisation rationnelle, équitable, efficace et économique du spectre radioélectrique par tous les services de radiocommunication, y compris les services par satellite, et de procéder à des études pour toutes les gammes de fréquences, à partir desquelles les Recommandations seront élaborées et adoptées.

Les fonctions réglementaires et politiques du Secteur des radiocommunications sont remplies par les Conférences mondiales et régionales des radiocommunications et par les Assemblées des radiocommunications assistées par les Commissions d'études.

## Politique en matière de droits de propriété intellectuelle (IPR)

La politique de l'UIT-R en matière de droits de propriété intellectuelle est décrite dans la «Politique commune de l'UIT-T, l'UIT-R, l'ISO et la CEI en matière de brevets», dont il est question dans la Résolution UIT-R 1. Les formulaires que les titulaires de brevets doivent utiliser pour soumettre les déclarations de brevet et d'octroi de licence sont accessibles à l'adresse <http://www.itu.int/ITU-R/go/patents/fr>, où l'on trouvera également les Lignes directrices pour la mise en œuvre de la politique commune en matière de brevets de l'UIT-T, l'UIT-R, l'ISO et la CEI et la base de données en matière de brevets de l'UIT-R.

### Séries des Rapports UIT-R

(Également disponible en ligne: <https://www.itu.int/publ/R-REP/fr>)

Séries	Titre
<b>BO</b>	Diffusion par satellite
<b>BR</b>	Enregistrement pour la production, l'archivage et la diffusion; films pour la télévision
<b>BS</b>	Service de radiodiffusion sonore
<b>BT</b>	Service de radiodiffusion télévisuelle
<b>F</b>	Service fixe
<b>M</b>	Services mobile, de radiorepérage et d'amateur y compris les services par satellite associés
<b>P</b>	Propagation des ondes radioélectriques
<b>RA</b>	Radio astronomie
<b>RS</b>	Systèmes de télédétection
<b>S</b>	Service fixe par satellite
<b>SA</b>	Applications spatiales et météorologie
<b>SF</b>	Partage des fréquences et coordination entre les systèmes du service fixe par satellite et du service fixe
<b>SM</b>	<b>Gestion du spectre</b>
<b>TF</b>	Émissions de fréquences étalon et de signaux horaires

*Note: Ce Rapport UIT-R a été approuvé en anglais par la Commission d'études aux termes de la procédure détaillée dans la Résolution UIT-R 1.*

Publication électronique  
Genève, 2024

© UIT 2024

Tous droits réservés. Aucune partie de cette publication ne peut être reproduite, par quelque procédé que ce soit, sans l'accord écrit préalable de l'UIT.

## RAPPORT UIT-R SM.2486-1

**Utilisation de drones commerciaux pour les activités  
de contrôle du spectre de l'UIT-R**

(2021-2024)

## TABLE DES MATIÈRES

	<i>Page</i>
1 Introduction .....	2
2 Composants fonctionnels des systèmes de contrôle des émissions fondés sur les drones commerciaux .....	3
2.1 Système de vol du drone .....	4
2.2 Systèmes de mesure et de contrôle des émissions .....	4
2.3 Commande de la mission de radiocommunication .....	5
2.4 Commande à distance de la mission de radiocommunication .....	5
3 Autres considérations .....	6
3.1 Conditions nécessaires au fonctionnement .....	6
3.2 Facteurs liés à l'incertitude des mesures .....	7
3.3 Limite actuelles présentées par les drones commerciaux .....	8
3.4 Facteurs de sécurité .....	9
4 Expérience et cas d'utilisation .....	11
4.1 Mesure de l'intensité du champ radioélectrique: signal de radiodiffusion télévisuelle numérique .....	11
4.2 Localisation d'un signal satellite sur la liaison montante provenant d'une microstation .....	14
4.3 Utilisation de drones commerciaux pour la localisation des émetteurs fondée sur la différence entre les instants d'arrivée .....	17
4.4 Essais en vol des installations de radionavigation au sol dans les aéroports .....	19

NOTE – Il convient d'appeler l'attention des utilisateurs sur le fait que, lorsque des drones commerciaux utilisés pour les activités de contrôle du spectre sont susceptibles de pénétrer de manière non intentionnelle ou intentionnelle dans l'espace aérien d'un autre pays, il est nécessaire d'obtenir l'autorisation expresse du pays concerné.

### Domaine d'application

Les drones commerciaux qui présentent des similitudes avec les stations de contrôle aéroportées classiques peuvent contribuer aux procédures réglementaires de mesure et de contrôle des émissions. Le contrôle des émissions au moyen de drones commerciaux peut être efficace dans des situations difficiles, lorsqu'il est impossible de surmonter les obstacles géographiques pour effectuer les mesures et les transmissions traditionnelles au sol ou pour assurer la sécurité des opérations. Il est entendu que l'utilisation des drones commerciaux traitée dans le présent Rapport s'effectue dans des conditions de visibilité directe par rapport aux opérations au sol et au sein du pays dont relèvent les autorités utilisant le drone.

Le présent Rapport donne des informations détaillées sur les éléments communs, les considérations liées aux incertitudes, les missions possibles ainsi que les cas d'utilisation des procédures de mesure et de contrôle du spectre effectuées au moyen de drones commerciaux.

### Abréviations

3D	tridimensionnel ( <i>three-dimensional</i> )
DTV	télévision numérique ( <i>digital television</i> )
EMI	brouillage électromagnétique ( <i>electromagnetic interference</i> )
GNSS	système mondial de navigation par satellite ( <i>global navigation satellite system</i> )
GPS	système mondial de localisation ( <i>global positioning system</i> )
GS	radioalignement de descente ( <i>glide slope</i> )
ILS	système d'atterrissage aux instruments ( <i>instrument landing system</i> )
INS	système de navigation par inertie ( <i>inertial navigation system</i> )
LOC	radiophare d'alignement de piste ( <i>localizer</i> )
OACI	Organisation de l'aviation civile internationale ( <i>international civil aviation organization</i> )
RTK	cinématique en temps réel ( <i>real-time kinematic</i> )
UAS	système d'aéronef sans pilote ( <i>unmanned aircraft system</i> )
UAV	aéronef sans pilote ( <i>unmanned aerial vehicle</i> )
VOR	radiophare omnidirectionnel à ondes métriques ( <i>VHF Omnidirectional range</i> )
VSAT	microstation ( <i>very small aperture terminal</i> )

## 1 Introduction

Selon la définition de l'Organisation de l'aviation civile internationale (OACI), les «systèmes d'aéronefs sans pilote», couramment appelés «aéronefs sans pilote», désignent des aéronefs ainsi que leurs éléments associés qui sont exploités sans pilote à bord. Les drones commerciaux relèvent de cette catégorie générale. À ce titre, ils sont en mesure de s'affranchir des limites géographiques et offrent un coût de vol relativement faible par rapport aux aéronefs avec pilote. Les drones commerciaux peuvent émettre et recevoir depuis des emplacements inaccessibles aux équipements au sol ainsi que depuis de multiples emplacements en un laps de temps très court, de la même manière que les stations d'aéronefs avec pilote classiques. Dans la mesure où les systèmes de contrôle des

émissions fixes ou mobiles conventionnels effectuent des mesures et des transmissions au sol ou à une hauteur limitée par rapport au sol, ils peuvent perdre en précision sous l'effet de l'environnement du site, par exemple en raison de la présence, à proximité, de bâtiments urbains, de montagnes, d'antennes à haute altitude et de zones côtières.

Les activités de mesure et de transmission qui pourraient être effectuées au moyen de drones commerciaux sont notamment les suivantes:

- mesures de l'intensité du champ radioélectrique;
- mesure du diagramme d'antenne tridimensionnel;
- mesures de la couverture radio;
- inspection des stations de contrôle des émissions sur place;
- inspection des stations radio sur place;
- entretien et étalonnage des stations et des équipements de contrôle des émissions;
- recherche de brouillages;
- radiogoniométrie pour déterminer l'emplacement d'un émetteur;
- études techniques et scientifiques.

Le contrôle des émissions au moyen de drones a l'avantage de permettre l'observation du spectre et la réalisation de mesures et d'enregistrements des signaux à une hauteur beaucoup plus élevée que ne le permettent les systèmes de contrôle au sol. Ce gain d'altitude peut être extrêmement utile pour les applications susmentionnées. En outre, le coût d'acquisition d'une plate-forme de drone à des fins de contrôle des émissions est largement inférieur à celui de la plupart des plates-formes mobiles de base.

## **2 Composants fonctionnels des systèmes de contrôle des émissions fondés sur les drones commerciaux**

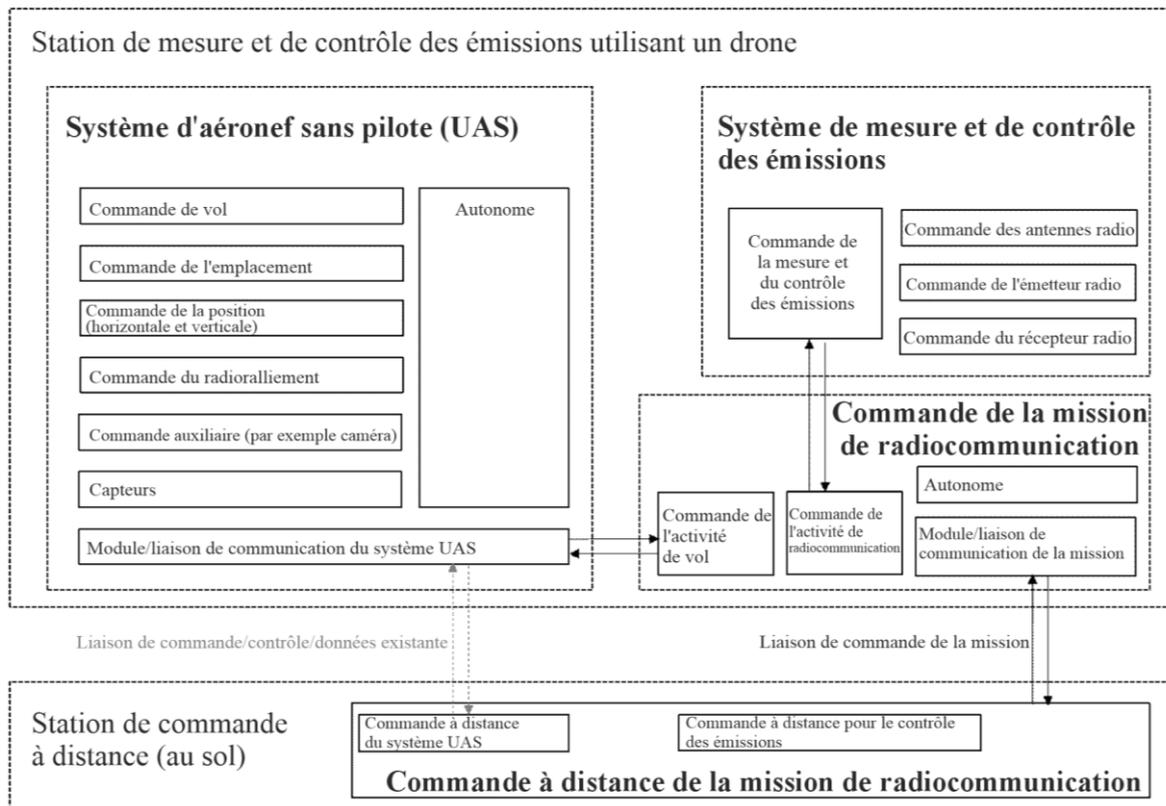
Les composants fonctionnels des systèmes de mesure et de contrôle des émissions fondés sur les drones commerciaux comportent quatre parties, comme indiqué dans la Fig. 1:

- le système de vol du drone;
- le système de mesure et de contrôle des émissions;
- la commande de la mission de radiocommunication;
- la commande à distance de la mission de radiocommunication.

La Figure 2 donne un exemple de station de contrôle des émissions utilisant un drone.

FIGURE 1

## Architecture fonctionnelle d'une station de mesure et de contrôle des émissions utilisant un drone



## 2.1 Système de vol du drone

Les drones commerciaux ont des composantes de commande analogues à celles des aéronefs avec pilote, et les principales fonctions requises pour le contrôle des émissions, en mode automatique ou manuel, sont les suivantes :

- commande de vol avec ou sans évitement des collisions;
- commande de l'emplacement et de l'altitude;
- commande de la position horizontale et verticale (vol stationnaire);
- commande du radioralliement (origine).

Les drones commerciaux peuvent généralement être commandés entièrement à distance depuis un emplacement éloigné, ou programmés à l'avance pour effectuer un vol de manière autonome, sans intervention. La précision de chaque méthode de commande dépend de la qualité de fonctionnement du drone en vol.

## 2.2 Systèmes de mesure et de contrôle des émissions

Le système de mesure et de contrôle des émissions peut comporter des équipements de réception et de mesure des ondes radioélectriques et des équipements permettant d'émettre des signaux. Le concept sur lequel se fondent ces systèmes est identique à celui qui sous-tend les équipements de test et de contrôle des émissions existants, mais le type, la taille et le poids de ces équipements sont limités par la capacité du drone (par exemple charge utile maximale, consommation électrique, dimensions et forme). À titre d'exemple, la taille du drone a des incidences sur la taille de l'antenne ou du réseau d'antenne qui déterminent la gamme de fréquences, et la taille et le poids de l'émetteur, du générateur de signaux ou de l'amplificateur de puissance sont directement limités par les capacités en termes de charge utile. En outre, les activités de mesure et de contrôle des émissions qui peuvent être effectuées

dépendent de la précision de la commande de l'emplacement. À titre d'exemple, si le drone est utilisé pour mesurer un diagramme d'antenne tridimensionnel en champ proche, il est nécessaire de garantir la précision de l'emplacement et de la commande du maintien en position.

### 2.3 Commande de la mission de radiocommunication

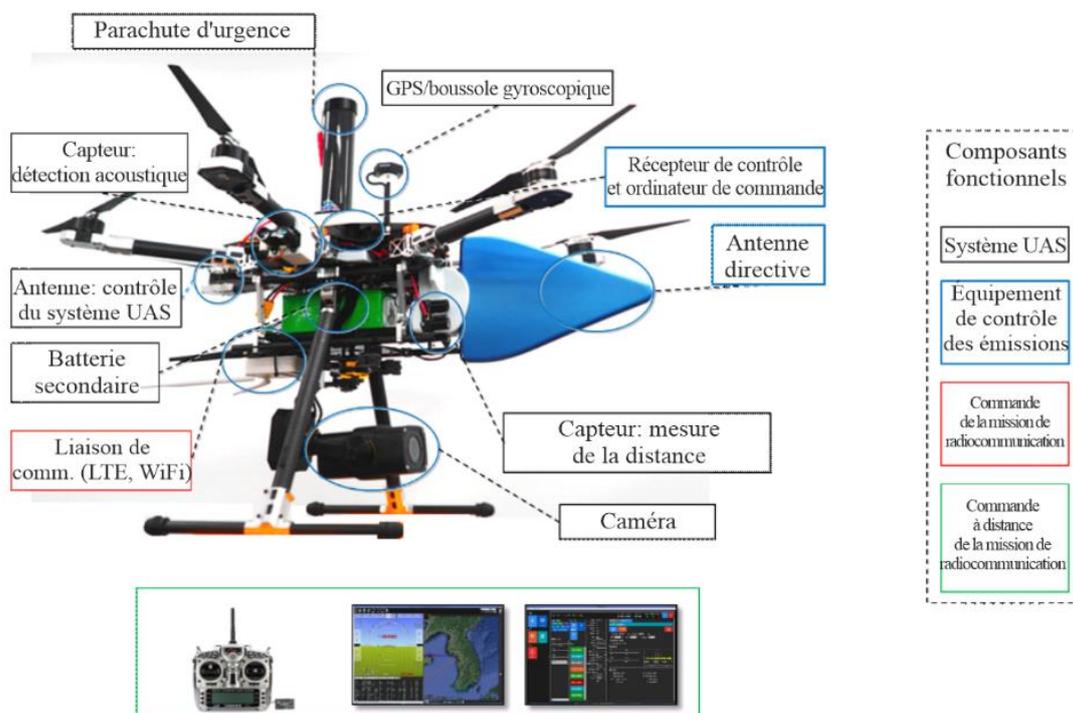
La commande de la mission de radiocommunication permet de coordonner le drone et le système de mesure et de contrôle des émissions afin d'effectuer une ou plusieurs tâches. La commande de la mission de radiocommunication permet de déplacer le drone vers un emplacement précis, d'effectuer des transmissions ou des mesures des émissions, de recueillir et de transférer les résultats. Elle comporte une liaison de communication pour le transfert de données de télémétrie et d'autres données vers la station de commande à distance (au sol) et utilise certaines des liaisons ou toutes les liaisons, en fonction du mode de vol et de la tâche de mesure. Selon la situation, le drone peut utiliser les liaisons de communication dédiées existantes, et les missions liées au contrôle des émissions peuvent être effectuées au moyen de la liaison de commande de la mission.

### 2.4 Commande à distance de la mission de radiocommunication

Les stations de mesure et de contrôle des émissions des drones commerciaux peuvent être entièrement commandées au moyen de la commande à distance de la mission de radiocommunication dans le cadre du processus de contrôle des émissions. La commande à distance de la mission de radiocommunication communique avec la commande de la mission de radiocommunication au moyen de la liaison de commande de la mission. L'utilisation de la liaison dépend du niveau d'automatisation des procédures de mesure et de contrôle des émissions et du mode de commande de vol du drone.

FIGURE 2

Exemple de système de mesure et de contrôle des émissions utilisant un drone



### **3 Autres considérations**

#### **3.1 Conditions nécessaires au fonctionnement**

##### **3.1.1 Incidences de la taille, du poids et de l'alimentation électrique sur la qualité de fonctionnement**

Dans la mesure où la taille relativement restreinte des drones limite l'espace d'installation, il est nécessaire de sélectionner les composants en fonction de leur taille, de leur poids et de leur consommation énergétique. Ces composants doivent être installés selon une configuration très peu encombrante, mais fonctionnelle, qui permet à la fois le vol et les opérations de mesure. Contrairement aux systèmes de mesure des émissions traditionnels, les composants radiofréquences pouvant être installés sur un drone (antennes, récepteurs et émetteurs) sont parfois caractérisés par une faible qualité de fonctionnement et une largeur de bande de fonctionnement étroite, c'est-à-dire présenter des caractéristiques particulières en termes de portée. Par conséquent, lors du déploiement d'un système de contrôle sur un drone, il est recommandé de mesurer, d'étalonner et de vérifier la qualité de fonctionnement globale du système avec tous les équipements de contrôle installés.

##### **3.1.2 Diagrammes d'antenne**

Les drones commerciaux comportent une quantité relativement faible de métal dans un souci de légèreté, mais il existe de nombreuses structures autour de l'antenne qui peuvent perturber la réception des signaux. Les trains d'atterrissage, les hélices ainsi que leurs bras, et les supports pour la fixation d'équipements périphériques tels que les caméras, peuvent perturber la réception des signaux dans certaines directions. Le diagramme d'une antenne installée sur un aéronef sans pilote a des incidences sur les résultats de la mesure. Pendant le vol, lorsque l'aéronef sans pilote est en mouvement continu, certains systèmes peuvent utiliser un réflecteur laser pour obtenir des données de position tridimensionnelles précises, de manière à pointer l'antenne dans la bonne direction. Afin d'élaborer un diagramme d'antenne efficace pour un drone, le diagramme est généralement mesuré dans une chambre anéchoïque. Dans le cas des mesures en chambre anéchoïque, tous les équipements nécessaires aux activités (par exemple le réflecteur laser) doivent être installés de façon à définir le diagramme avec précision.

##### **3.1.3 Bruit de fond**

Les drones commerciaux sont équipés d'un certain nombre de dispositifs radiofréquences à bord pour:

- le système existant de commande à distance et de transmission des données;
- les liaisons de communication pour la mission de contrôle des émissions; et
- les composants qui peuvent être sources de brouillages électromagnétiques, tels que les moteurs électriques et les sources d'alimentation.

En conséquence, les niveaux de bruit peuvent être anormalement élevés dans certaines bandes de fréquences. Il peut être nécessaire d'éteindre certains de ces équipements afin d'améliorer l'environnement de mesure.

##### **3.1.4 Réglementations nationales en matière de vol**

Étant donné qu'il existe des réglementations nationales visant à limiter les zones, heures et modalités de vol pour chaque type de drone (notamment en fonction de leur poids total et de leur taille), il est nécessaire de s'y conformer et de contacter l'autorité responsable de l'aviation civile compétente à l'avance, selon le cas.

### **3.2 Facteurs liés à l'incertitude des mesures**

Dans la mesure où ils ne sont pas fermement attachés au sol, les drones essaient de se maintenir à une position donnée à l'aide de divers capteurs et algorithmes. Par conséquent, toute volatilité ou mouvement soudain pendant le temps d'acquisition du signal peut entraîner une incertitude de mesure et une variation des résultats. Par exemple, si une mesure est effectuée en un même endroit à un moment différent, les résultats de mesure pour un signal à tonalité unique peuvent être différents. Bien que les drones soient commandés de façon à maintenir la même position, dans les mesures réelles, on peut supposer que la volatilité de l'environnement opérationnel aura des incidences sur les résultats.

Les principales sources d'incertitudes susceptibles de contribuer à la volatilité des mesures sont notamment les suivantes:

#### **3.2.1 Commande de vol par un seul opérateur**

Lorsque le drone est commandé à distance par un opérateur, il est difficile de gérer simultanément le vol jusqu'aux coordonnées de la cible et la réalisation des mesures ou des transmissions. Si la position du drone change soudainement en raison des conditions météorologiques, du vent ou de lectures de position inexactes, il est presque impossible pour un seul opérateur de confirmer visuellement et de maintenir la position fixe.

#### **3.2.2 Commande de l'emplacement au moyen du système mondial de navigation par satellite (GNSS)**

Les drones utilisent généralement le système GNSS pour la navigation, notamment le système mondial de localisation (GPS) ou les systèmes GLONASS, Galileo, Beidou, et s'appuient sur le système de navigation par inertie (INS) afin d'assurer une précision à court terme. Ces signaux sont également sensibles aux interférences ou aux brouillages et peuvent s'affaiblir ou disparaître de manière soudaine dans certains environnements pendant le vol. La qualité de la réception GNSS peut être dégradée en raison des brouillages électromagnétiques produits par différents périphériques du drone lui-même, ou des conditions météorologiques telles que les vents forts ou les nuages épais. Ces éléments peuvent entraîner l'instabilité du vol stationnaire, ce qui nuit à la précision des mesures ou des transmissions. Il est possible d'utiliser plusieurs récepteurs GNSS ou récepteurs multifréquences ou d'apporter des améliorations dans le domaine des brouillages électromagnétiques, par exemple, afin d'améliorer la qualité de réception des signaux de navigation et, partant, la stabilité de la plate-forme du drone.

Le système GPS comporte des erreurs dans le plan horizontal de l'ordre de plusieurs mètres dans des conditions normales et des erreurs dans le plan vertical qui sont 1 à 2 fois plus grandes que celles dans le plan horizontal. Afin d'améliorer la précision de la position, on peut utiliser la technologie GPS cinématique en temps réel (RTK), comme c'est le cas dans le domaine de la surveillance, par exemple. Il est ainsi possible d'obtenir une marge d'erreur de quelques centimètres en ce qui concerne la position.

#### **3.2.3 Commande de la position horizontale et verticale (vol stationnaire) et radioralliement**

Les drones se maintiennent à la position cible avec une grande précision, mais peuvent s'incliner ou tourner, ce qui entraîne des erreurs importantes dans les mesures en champ proche.

#### **3.2.4 Caractéristiques de l'antenne de mesure et de transmission**

En fonction de la mission, les drones peuvent être équipés d'antennes directives, omnidirectives ou de réseaux d'antennes. Même lorsque l'on installe une antenne dont le diagramme de rayonnement est connu, il est nécessaire de vérifier le diagramme de rayonnement après installation, en tenant compte des incidences produites par le corps du drone ou les périphériques. L'altitude et l'attitude/l'inclinaison

du drone peuvent également être modifiées pendant la mesure ou la transmission, de sorte qu'il peut être nécessaire de mesurer le diagramme d'antenne tridimensionnel dans la bande de fréquences cible. Lors de l'utilisation d'une antenne directive, l'état de radioralliment du drone et le diagramme d'antenne ont des incidences plus importantes sur les résultats de la mesure. En règle générale, il est plus important de connaître le diagramme d'antenne dans les missions en champ proche. En effet, l'étalonnage a davantage d'importance dans le cas de la reconstitution de la source lorsque l'on effectue des mesures en champ proche et que l'on les convertit en mesures en champ lointain.

### **3.2.5 Influence du vent**

Même lorsque l'on parvient à améliorer la précision de la localisation grâce la technologie cinématique en temps réel ou à une autre technologie, le vent peut influencer en permanence sur le drone et le faire dévier brusquement de sa position. La plupart des drones de loisir vendus dans le commerce ne garantissent pas un fonctionnement stable ou sécurisé dans des conditions venteuses, et l'on recense de nombreux accidents liés au vent dans le cadre de tests de contrôle hertziens effectués à l'aide de drones. Afin que la mission de contrôle des émissions soit couronnée de succès, il peut être nécessaire de surveiller et d'enregistrer la vitesse du vent pour chaque vol ou pour chaque mesure, ce qui peut permettre de mieux comprendre les résultats des mesures.

## **3.3 Limite actuelles présentées par les drones commerciaux**

Malgré leurs nombreux avantages, les drones présentent bon nombre des limites qui caractérisent les aéronefs traditionnels.

### **3.3.1 Positionnement et radioralliment**

Le contrôle de l'attitude présente certaines limites, lorsque les capacités de détection des capteurs sont imprécises et/ou qu'il existe des courants atmosphériques. Par exemple, il est possible que le drone ne signale pas la direction du point d'origine réel au moment où le capteur de mouvement du drone le détecte. Si le drone est utilisé sans élément supplémentaire visant à compenser la rotation et l'inclinaison, comme un équipement laser, l'angle de mesure peut facilement varier de plusieurs degrés, entraînant une erreur de mesure.

### **3.3.2 Dépendance par rapport aux conditions météorologiques**

La planification des missions repose sur les prévisions météorologiques. Cependant, ce facteur doit être vérifié sur place, et il s'agit de l'aspect influant le plus sur les activités effectuées au moyen des drones. Les températures élevées ou basses peuvent également avoir des incidences négatives sur les batteries, les capteurs, les moteurs et les équipements de contrôle des émissions. Il est aussi difficile d'utiliser des drones dans des conditions de forte humidité, de brouillard, de pluie ou de neige, et leur utilisation peut être limitée par le climat local de la zone de mesure. En outre, les vents forts rendent les drones difficiles à piloter et peuvent avoir des incidences néfastes sur les résultats des mesures.

### **3.3.3 Courte durée de fonctionnement**

L'alimentation électrique étant limitée, le temps de vol des drones est généralement inférieur à quelques dizaines de minutes, et des batteries de rechange et des bornes de recharge sont nécessaires pour une utilisation répétée.

### **3.3.4 Taille, poids et alimentation électrique**

Les drones commerciaux, qu'il est facile de se procurer, sont relativement petits et légers, ce qui limite considérablement le poids de la charge utile, y compris l'alimentation électrique, les périphériques montables, les antennes et les récepteurs de contrôle des émissions.

### 3.3.5 Risque d'accident

Les systèmes présentent de nombreuses contraintes et comportent des risques d'accident. Lorsqu'ils sont en vol, les drones comportent toujours des risques d'accident, notamment en ce qui concerne des risques de blessures aux personnes et d'endommagement des biens ou des systèmes embarqués pendant le fonctionnement.

### 3.3.6 Coût et réglementation

Compte tenu des nombreuses limites liées à l'environnement et à la méthode d'exploitation, ainsi que du risque d'accident, il est nécessaire d'évaluer la rentabilité de l'utilisation de drones pour le contrôle des émissions à des fins particulières.

## 3.4 Facteurs de sécurité

Les drones commerciaux se déplacent dans l'air comme n'importe quel aéronef. L'opérateur doit donc exploiter l'aéronef UAV de manière à garantir la sécurité des autres utilisateurs de l'espace aérien, ainsi que celle des personnes et des biens au sol. Par ailleurs, un drone équipé d'un système de contrôle des émissions constitue un bien coûteux pour un organisme, or il peut être exposé à des chutes et faire l'objet de réparations coûteuses à la suite d'une chute. Dans ce contexte, il peut être nécessaire d'installer un capteur de détection acoustique permettant de détecter et d'éviter une collision en vol, un parachute en cas de chute accidentelle, une liaison de communication de secours et un système de localisation de secours.

De plus, pendant l'exploitation de l'aéronef UAV, il convient de tenir compte des facteurs suivants:

- les missions de contrôle du spectre doivent être confiées à une équipe composée d'un pilote, d'un opérateur responsable du contrôle et, à titre d'option, d'un autre opérateur responsable de la surveillance des conditions de la zone environnante;
- la gestion de l'espace aérien (opérations à proximité d'aéroports/d'autres utilisateurs de l'espace aérien);
- les considérations relatives aux équipements (fixation de la charge utile sur l'aéronef UAV);
- le choix de l'emplacement pour l'opérateur de l'aéronef UAV;
- les considérations environnementales (conditions météorologiques, vitesse du vent);
- la redondance des données (canaux de secours);
- la prévention des accidents et la sécurité des personnes au sol.

### 3.4.1 Considérations liées à l'espace aérien

Pour assurer la sécurité de l'espace aérien pendant les vols, de nombreux pays ont publié des lois et des réglementations en matière de vol adaptées à leurs conditions particulières.

### 3.4.2 Considérations liées à la charge utile de l'équipement

Pour fixer l'équipement de surveillance sur l'aéronef UAV, il peut être nécessaire que l'aéronef fasse l'objet de modifications apportées par le fabricant de l'équipement d'origine. Dans ce cas, il conviendra de tenir compte d'autres considérations, comme indiqué dans le présent rapport. Les aéronefs UAV commerciaux non modifiés sont caractérisés par une intégrité structurelle et un comportement pendant le vol connu. Une fois que l'équipement de contrôle des émissions est fixé sur l'aéronef UAV, son comportement pendant le vol peut changer. Il convient de prendre des mesures afin de protéger les équipements et l'environnement dans lequel le drone fonctionne. Certains aéronefs UAV commerciaux sont conçus pour transporter de lourdes charges utiles. Si l'équipement de contrôle respecte la capacité de charge utile indiquée par le fabricant de l'aéronef UAV, l'intégrité structurelle du système UAV est maintenue.

FIGURE 3

Structure du système de contrôle au moyen d'un aéronef UAV



### 3.4.3 Choix de l'emplacement pour l'opérateur de l'aéronef UAV

Afin d'assurer un contrôle et une localisation efficaces des émetteurs, les opérateurs doivent trouver un site pour le lancement et le contrôle des aéronefs UAV, qui soit avantageux pour mener à bien les activités de contrôle et maintenir une visibilité directe avec le drone (si nécessaire), et qui permette de garantir la sécurité des opérations et des autres personnes pouvant se trouver à proximité. En outre, le choix de l'emplacement peut nécessiter la coordination avec les autorités nationales/locales, par exemple dans le cas de zones d'accès restreint.

### 3.4.4 Redondance des communications

Les émetteurs-récepteurs UAV sur la liaison montante et sur la liaison descendante utilisent généralement une des bandes ISM. Ces bandes de fréquences, qui ne sont pas assujetties à une licence, subissent souvent des brouillages. C'est pourquoi il est important que les aéronefs UAV disposent de commandes de communication adaptatives de manière à pouvoir, à titre d'exemple, changer de canaux de fréquences en cas de brouillage. Bon nombre d'unités de commande d'aéronefs UAV commerciaux appliquent les sauts de fréquence sur la liaison montante pour atténuer les brouillages inhérents aux bandes ISM; qui sont les plus couramment utilisées pour la commande et le contrôle des drones. Bien entendu, les bandes de fréquences attribuées aux applications ISM varient selon les régions et les pays, mais les bandes des 2,4 GHz et des 5,8 GHz sont le plus souvent utilisées.

La transmission en temps réel des données de contrôle des émissions sur la liaison descendante d'un aéronef UAV peut être essentielle pour certaines activités de contrôle. En outre, les activités de contrôle des émissions nécessitent souvent de diffuser en direct un flux vidéo et des données de télémétrie sur la liaison descendante. Cela étant, il faut peut-être maintenir des débits de données élevés entre l'aéronef UAV et la station de commande au sol pendant la durée du vol. Afin de garantir l'intégrité des données de mission, le rayon d'action de la plate-forme de contrôle UAV devrait être limité à la portée spécifiée par le fabricant des commandes UAV. Le système de contrôle UAV devrait également avoir la capacité de retransmettre automatiquement les données dont l'unité de commande au sol UAV n'a pas accusé réception, de sauvegarder les données et de retourner au point de lancement en cas de défaillance des liaisons de communication.

### 3.4.5 Prévention des accidents

De nombreux facteurs peuvent conduire à l'accident d'un aéronef UAV, notamment des facteurs externes, comme les conditions météorologiques (vents forts), les oiseaux, les brouillages RF et d'autres obstacles, ainsi que d'autres facteurs évitables, comme la distraction du pilote ou des conditions de batterie faible. Lorsqu'un aéronef UAV transportant une lourde charge utile de contrôle doit être utilisé, il est nécessaire d'effectuer tous les contrôles nécessaires avant le vol de manière à garantir la sécurité de l'aéronef UAV, de la charge utile de contrôle et du personnel qui peut se trouver dans sa zone d'exploitation. L'ajout d'alarmes sonores et lumineuses (souvent présentes sur les gros aéronefs UAV) visant à alerter les personnes au sol qu'un aéronef UAV risque de s'écraser fournira une protection de base. Les aéronefs UAV commerciaux présentent des caractéristiques de sécurité qui permettent l'atterrissage d'urgence dans certaines conditions (c'est-à-dire en cas de batterie faible). Certaines plates-formes de drones sont équipées de parachutes, qui peuvent être déployés manuellement ou lorsqu'une certaine chute verticale est détectée, afin de protéger les personnes qui se trouvent au sol et le drone. Ces fonctionnalités sont également utiles pour prévenir les atterrissages en catastrophe.

### 3.4.6 Considérations environnementales

Les vols d'aéronefs UAV peuvent subir les effets de conditions environnementales telles que les vents forts, la pluie et les tempêtes de sable. Ces conditions peuvent également mettre à rude épreuve les systèmes de maintien en position, ce qui entraîne une décharge plus rapide des batteries que dans des conditions calmes. Les conditions environnementales et leurs effets doivent faire l'objet d'un examen attentif de la part des opérateurs avant de réaliser des missions de contrôle à l'aide d'aéronefs UAV.

## 4 Expérience et cas d'utilisation

### 4.1 Mesure de l'intensité du champ radioélectrique: signal de radiodiffusion télévisuelle numérique

La présente sous-section vise à décrire la mesure des signaux radioélectriques pour la radiodiffusion de Terre au moyen d'une plate-forme UAV et à comparer les résultats avec les mesures effectuées avec un système de contrôle fixe traditionnel.

La Figure 4 donne une illustration du système de contrôle des émissions à distance au moyen d'un aéronef UAV.

FIGURE 4

### Système de contrôle des émissions à distance au moyen d'un aéronef UAV

Domaine d'activité du système de contrôle des émissions au moyen d'un aéronef UAV



Système de contrôle des émissions au moyen d'un aéronef UAV



#### 4.1.1 Considérations techniques

Des cardans à trois axes portatifs sont utilisés dans les systèmes de stabilisation conçus pour offrir à l'opérateur de la caméra l'indépendance qui caractérise la prise de vue à main levée, sans vibration ni tremblement de la caméra, afin d'éliminer les erreurs de mesure liées aux images floues pendant le vol.

Il convient d'envisager l'utilisation de la technologie cognitive visuelle pour définir correctement le lieu d'atterrissage. Le point d'atterrissage programmé du drone peut présenter un écart de trois mètres. Pour pallier ce décalage potentiel, l'aéronef UAV doit être contrôlé visuellement pendant le processus d'atterrissage.

Lorsque l'on effectue des mesures dans la bande des ondes décimétriques, il convient de documenter et de mesurer le bruit radioélectrique susceptible d'être causé par les moteurs de l'aéronef UAV.

Les exploitants doivent tenir compte de la taille, du poids, de la charge utile et de la durée de fonctionnement de l'aéronef UAV, puisque les équipements de mesure seront installés sur l'aéronef UAV.

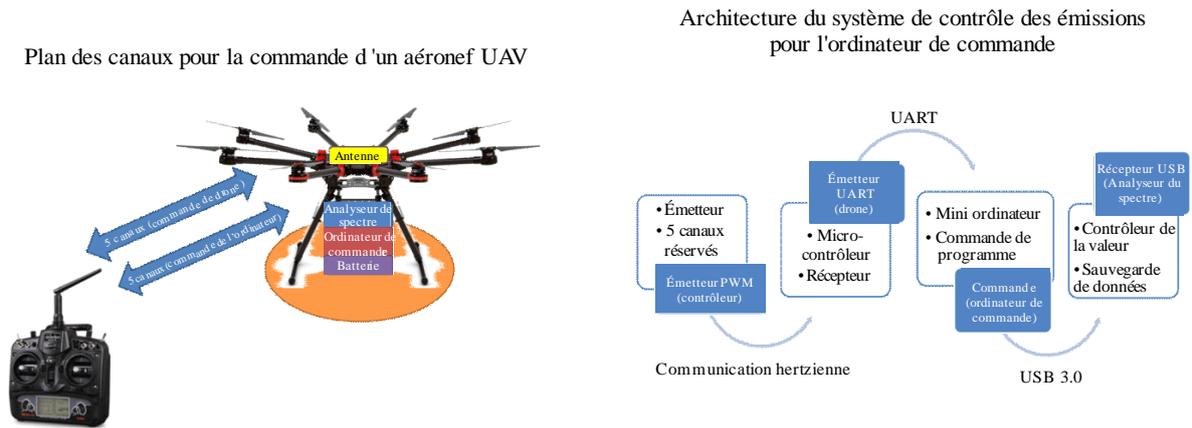
Les facteurs qui doivent être pris en considération lors du choix de l'équipement de contrôle à utiliser sur l'aéronef UAV sont notamment la taille, le poids, l'alimentation électrique et la qualité de fonctionnement.

Lors du choix d'un ordinateur de commande, il est nécessaire de définir les spécifications pertinentes (système d'exploitation, unité centrale de traitement, capacité de la mémoire, etc.) en fonction des exigences de l'équipement de contrôle.

L'équipement de contrôle est commandé au moyen des dix canaux de communication disponibles de la commande à distance. Cinq des canaux sont utilisés pour commander l'aéronef UAV et les cinq autres canaux permettent de commander le programme informatique et faire fonctionner l'équipement embarqué.

FIGURE 5

Schéma d'un système de contrôle des émissions au moyen d'un aéronef UAV

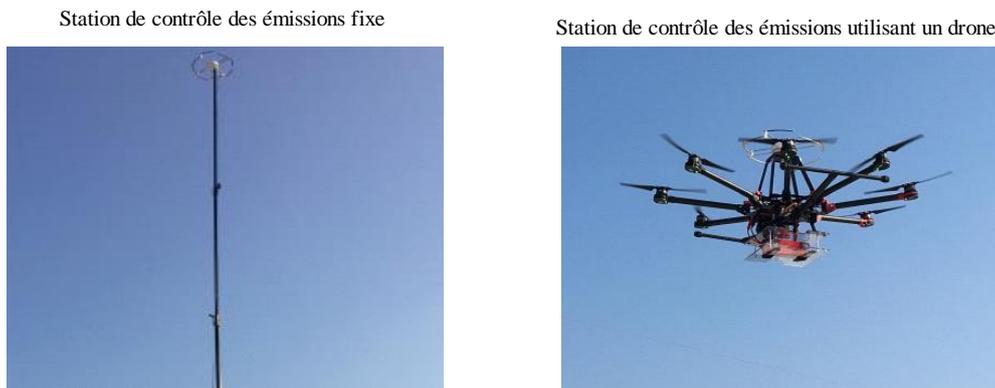


4.1.2 Expérience concernant la mesure du signal de radiodiffusion télévisuelle numérique de Terre au moyen d'un aéronef UAV

On trouvera ci-dessous une comparaison des résultats de mesure pour la radiodiffusion télévisuelle numérique de Terre entre une station de contrôle des émissions fixe et une station de contrôle des émissions à distance au moyen d'un drone.

FIGURE 6

Station de contrôle des émissions pour la radiodiffusion télévisuelle numérique



Pour les signaux de radiodiffusion télévisuelle numérique, la hauteur de l'antenne est de 9 mètres au-dessus du sol aux fins de la mesure. La méthode existante (station de contrôle des émissions fixe) nécessite l'installation d'un mât d'antenne sur le véhicule et prend plus de temps. Elle est aussi plus coûteuse pour obtenir des mesures et des résultats sur un nombre limité de sites de mesure. Cependant, lorsque l'on utilise un drone dans le cadre du processus de contrôle, il est possible d'effectuer des contrôles à une hauteur de 9 mètres de façon stable et depuis des endroits difficiles d'accès pour les véhicules.

Les mesures ont été prises en utilisant les deux méthodes sur cinq chaînes de télévision numérique émettant depuis le mont Moak dans la ville de Jeonju. La comparaison des résultats entre les deux méthodes montre une variation de 1 à 2 dB, ce qui est négligeable, car cette variation correspond à l'erreur de mesure que l'on constate avec la méthode existante. La partie gauche de la Figure 7 montre le spectre de mesure sur la base de la méthode de mesure des ondes radioélectrique fixe au moyen du mât d'antenne, et la partie droite montre le spectre de mesure sur la base de la méthode de mesure des ondes radioélectriques à distance au moyen de drones. Le Tableau 1 présente les résultats de mesure pour tous les canaux de radiodiffusion transmis depuis le mont Moak. Ce rapport démontre qu'il est

possible d'utiliser les drones comme systèmes de contrôle des émissions à distance, étant donné que le résultat de la mesure obtenu au moyen d'un système de contrôle des émissions fixe conventionnel avec un mât d'antenne est comparable au résultat obtenu lorsque l'on utilise des drones.

FIGURE 7

### Résultat du contrôle des émissions pour une station de radiodiffusion télévisuelle numérique de Terre

Avec un système de contrôle du spectre fixe



Avec un système de contrôle du spectre utilisant un drone



TABLEAU 1

### Renseignements détaillés sur le contrôle des émissions pour une station de radiodiffusion télévisuelle numérique de Terre

Chaîne de télévision numérique (Mont Moak)	Fréquence (MHz)	Station fixe (dBm)	Drone (dBm)	Variation (dB)
27	551	-46	-48	2
33	587	-51	-49	2
41	635	-48	-49	1
44	653	-48	-47	1
46	665	-47	-46	1

## 4.2 Localisation d'un signal satellite sur la liaison montante provenant d'une microstation

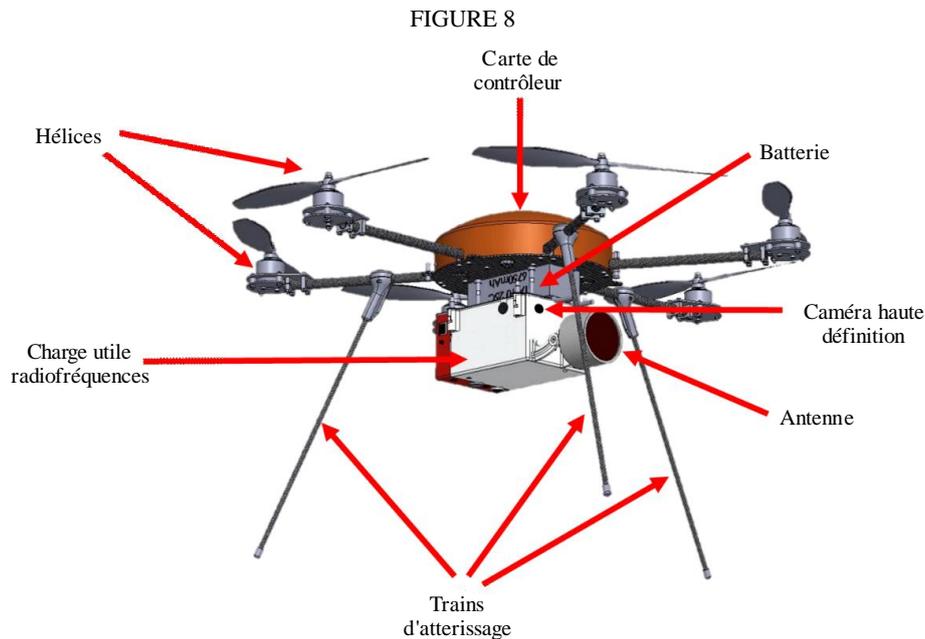
### 4.2.1 Introduction

La présente section contient un exemple concernant l'utilisation d'une plate-forme UAV pour détecter et localiser un signal satellite sur la liaison montante provenant d'une microstation.

### 4.2.2 Informations concernant le système

#### 4.2.2.1 Aéronef sans pilote

La plate-forme UAV comprend 6 hélices et assure le décollage et l'atterrissage verticaux. Elle est équipée d'une caméra haute définition (HD) et de deux charges utiles couvrant la bande de fréquences 2-40 GHz. La Figure 8 présente les composants de l'aéronef UAV.



La station au sol de l'aéronef UAV comprend une manette, un ordinateur portable, un module de télémétrie et un anémomètre.

**4.2.2.2 Système de contrôle des émissions (charge utile radiofréquences)**

La plate-forme UAV peut contrôler la bande de fréquences 2-40 GHz en utilisant deux charges utiles, comme indiqué ci-dessous :

Paramètres	Charge utile en bandes L, C, X et Ku	Charge utile en bande Ka
Bande de fréquences	Antenne de réception 2-18 GHz	Antenne de réception 18-40 GHz
Polarisation	Polarisation circulaire gauche et droite	Polarisation circulaire gauche et droite

La communication entre la station au sol et l'aéronef UAV s'effectue au moyen d'une liaison hertzienne dans la bande des 2,4 GHz.

**4.2.2.3 Commande et opérations**

Le drone peut fonctionner selon deux modes: manuel et automatique. Il peut être commandé manuellement par un opérateur au moyen d'une manette afin de voler dans n'importe quelle direction voulue. Une autre solution consiste à définir et à programmer l'itinéraire de vol en amont, en utilisant le logiciel pour charger un plan de vol dans l'aéronef UAV. Pour des raisons de sécurité, l'aéronef UAV est équipé d'une fonction d'atterrissage de sécurité à la position de base en cas d'épuisement de la batterie.

**4.2.3 Mesures et résultats**

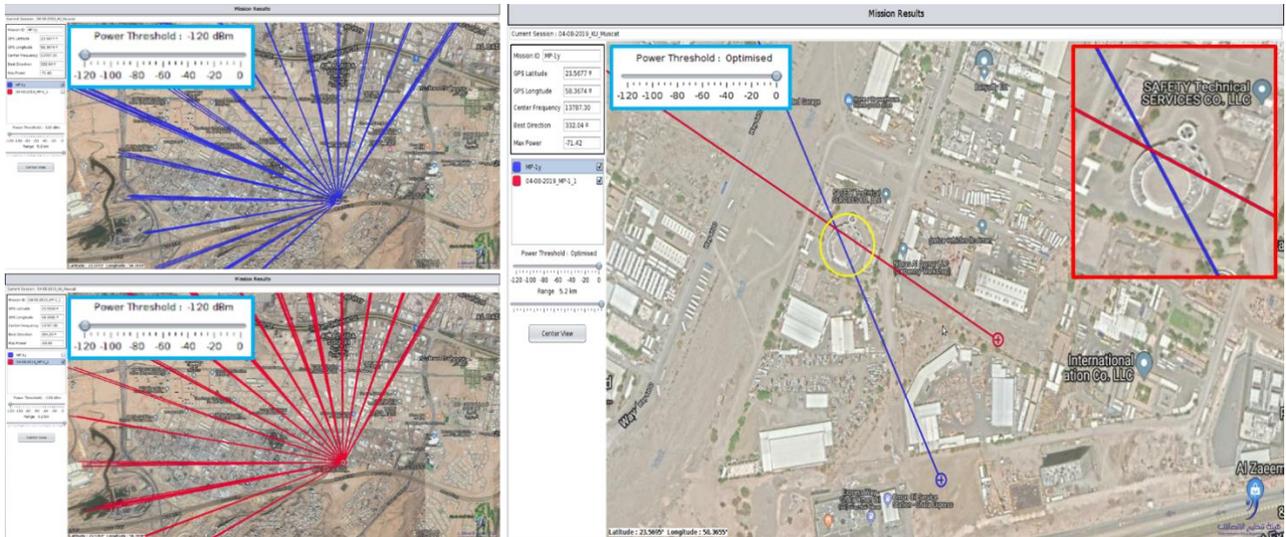
Pour effectuer ce type de mesure, il faut prendre en compte certaines considérations avant d'effectuer la mission dans une zone étendue spécifiée, par exemple en identifiant le lieu de la mesure et les points en vol pour localiser l'antenne cible, ainsi que la direction de l'emplacement présumé de la cible.

La Figure 9 montre les résultats de mesure de la mission de l'aéronef UAV. Au cours de la mission, le drone a mesuré la fréquence cible à partir de deux points de mesure et à différents angles donnés. Grâce à l'utilisation d'un compteur de seuil de puissance, les résultats des mesures peuvent être filtrés sur la carte pour ne visualiser que les directions dans lesquelles la puissance reçue est élevée (image

de gauche). Le système UAV peut ensuite fournir un résultat optimisé qui montre la meilleure direction de mesure calculée sur la base de la puissance reçue dans toutes les directions. L'intersection des résultats optimisés, entourée en jaune, à partir de deux points de mesure en vol montre l'emplacement de l'émetteur de la microstation (image de droite).

FIGURE 9

### Résultats et analyse de mesures effectuées au moyen d'un aéronef UAV



Sur la base de la mesure ci-dessus, la caméra intégrée de l'aéronef UAV permet d'identifier toute antenne placée à haute altitude, et des photos sont prises à chaque angle pour vérifier si une antenne est visible dans la direction de la puissance maximale reçue. La Figure 10 montre la photo de l'émetteur de la microstation.

FIGURE 10

### Photos prises par l'aéronef UAV



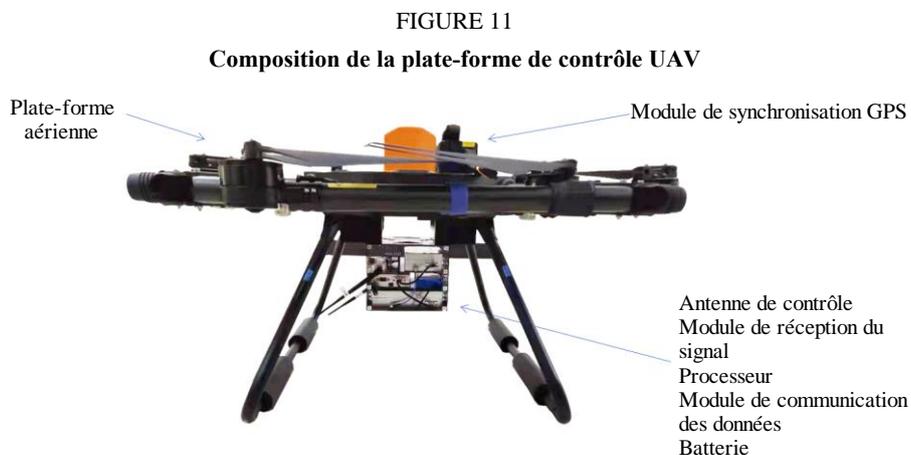
### 4.3 Utilisation de drones commerciaux pour la localisation des émetteurs fondée sur la différence entre les instants d'arrivée

#### 4.3.1 Présentation

Le contrôle du spectre peut comprendre des tâches telles que le balayage du spectre, la détection et la localisation de signaux inconnus ou brouilleurs. La différence entre les instants d'arrivée (TDOA) est une technologie de localisation passive qui offre certains avantages pour la localisation des émetteurs dans les bonnes circonstances. La technologie des drones commerciaux est aujourd'hui mature et largement utilisée, et permet de bénéficier d'un lancement rapide, d'un maintien en position précis, d'une mobilité et d'une sécurité élevées. Combiner les avantages offerts par ces deux technologies (méthode TDOA et aéronefs UAV) permettrait de déterminer avec précision l'emplacement des émetteurs. Bien sûr, la méthode TDOA pour déterminer l'emplacement d'un émetteur présente les mêmes avantages et limites lorsqu'elle est utilisée à partir de plates-formes UAV, mais ce cas de figure permettrait de surmonter les obstacles géographiques et d'améliorer l'observation des signaux en visibilité directe (LOS).

#### 4.3.2 Mise en œuvre

Dans le cas de figure évoqué, le système de contrôle basé sur la méthode TDOA comprend au moins trois plates-formes de contrôle UAV et un centre de commande au sol. Chaque plate-forme de contrôle UAV comprend un aéronef UAV à 6 rotors équipé d'un module de synchronisation GPS, d'une antenne de contrôle, d'un module de réception du signal, d'un processeur, d'un module de communication de données et d'une batterie. Le module de synchronisation GPS permet l'acquisition synchrone de signaux sur plusieurs plates-formes de contrôle UAV. Le module de réception du signal couvre la gamme de 100 MHz à 6 GHz, à l'exception des fréquences de commande et de communication avec les plates-formes de contrôle UAV (en général, les bandes ISM des 2,4 GHz et des 5,8 GHz). Pour les mesures fondées sur la méthode TDOA, il est possible d'utiliser une antenne équidirective ou une antenne directive, mais il faut tenir compte de l'incidence de la taille et du poids de l'élément d'antenne sur la plate-forme de contrôle UAV. Si l'on utilise une antenne directive, les mouvements rotationnels de l'aéronef UAV peuvent être utilisés pour déterminer l'azimut produisant le meilleur rapport signal/bruit. Le poids de la charge utile de contrôle du spectre est de 2,8 kg, et le temps de vol maximal sous une telle charge utile est de 30 minutes. La plate-forme de contrôle UAV est représentée dans la Fig. 11.



Le centre de commande au sol comprend une manette de commande, un ordinateur portable et un module de communication des données. La manette de commande fonctionne dans la bande ISM des 2,4 GHz pour commander le décollage, l'atterrissage, le vol stationnaire et le vol de l'aéronef UAV. La plate-forme de contrôle UAV pourrait transmettre des données au centre de

commande dans la bande ISM des 5,8 GHz. L'ordinateur portable exécute le logiciel TDOA. Le logiciel TDOA reçoit les données de séries temporelles et les données relatives au spectre, et calcule le résultat de la localisation. Les plates-formes de contrôle UAV effectuent l'acquisition des signaux et la transmission des données via le module de communication de données.

### 4.3.3 Exemple de flux de travail et de cas d'application

Lors du processus de détection des signaux, les plates-formes de surveillance UAV s'élèvent et se positionnent de manière à créer la condition spatiale 3D nécessaire au contrôle TDOA. Le centre de commande est responsable du traitement des données et de l'exécution du logiciel TDOA afin de calculer l'emplacement de l'émetteur cible et d'afficher le résultat de la géolocalisation. Le déroulement des opérations est illustré dans la Figure 12, qui contient une description en quatre étapes du processus.

Étape 1: au moins trois plates-formes de contrôle UAV sont lancées et déployées à différents endroits où elles peuvent recevoir le signal radio, afin d'y réaliser le contrôle. Afin d'améliorer la précision de localisation, positionner les plates-formes de contrôle UAV déployées en triangle ou en polygone autour de la zone considérée. Dans tous les cas, il convient d'éviter de déployer les plates-formes de contrôle en ligne droite.

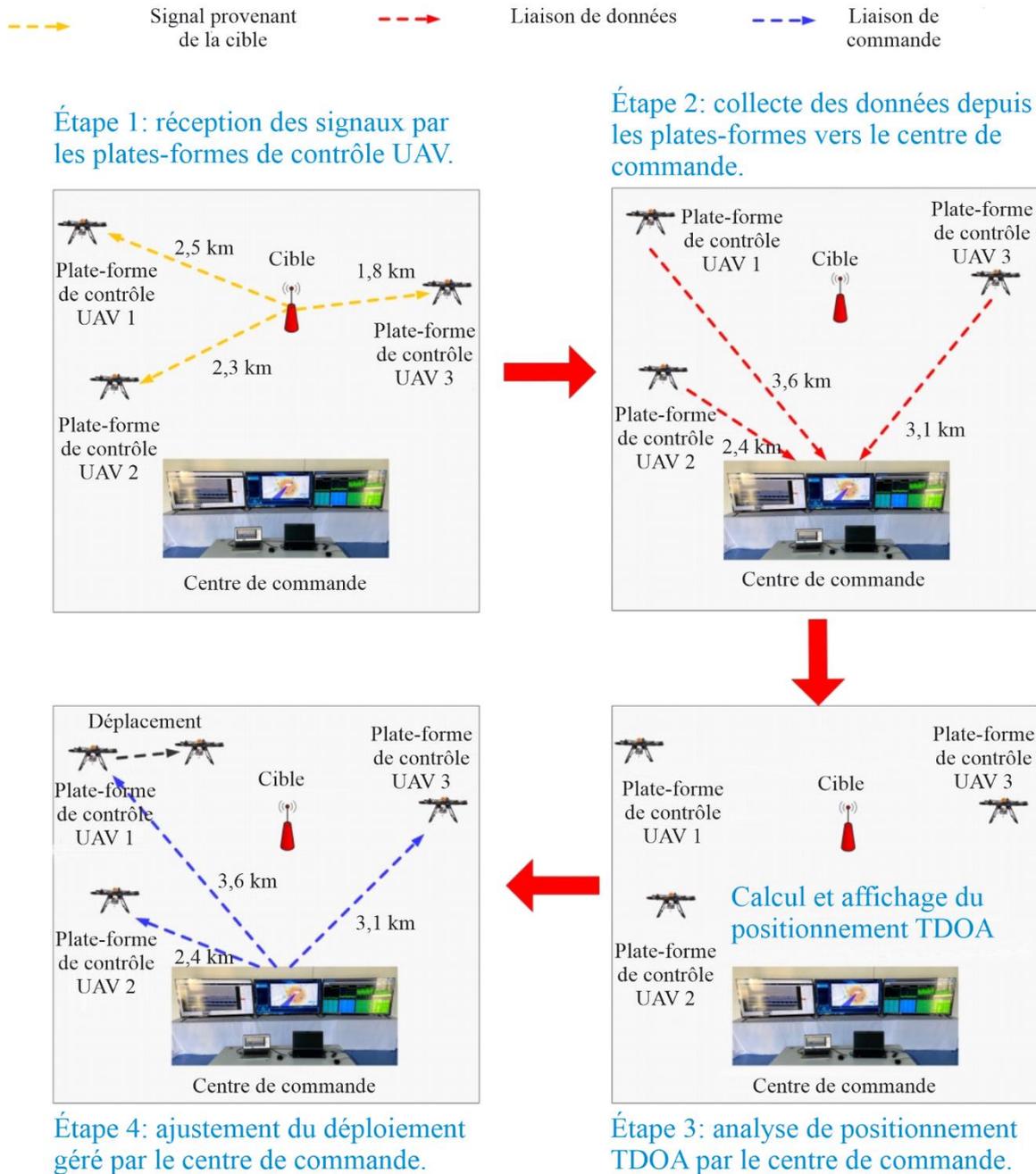
Étape 2: les plates-formes de contrôle UAV transfèrent les données reçues au centre de commande via la liaison de données, y compris l'heure précise d'arrivée du signal et l'emplacement actuel des plates-formes de contrôle UAV.

Étape 3: le centre de commande collecte les données auprès d'au moins trois plates-formes de contrôle UAV, le logiciel TDOA localise l'émetteur cible et affiche sa position estimée sur la carte.

Étape 4: après les premières mesures TDOA, il peut être nécessaire d'ajuster la position relative des plates-formes de contrôle UAV afin d'améliorer la géométrie, le rapport signal/bruit, les évanouissements ou les effets de la propagation par trajets multiples. Dans ce cas, le centre de commande enverra de nouveaux emplacements de déploiement à chaque plate-forme de contrôle UAV via la liaison de données et, une fois que les plates-formes UAV auront reçu la nouvelle commande de déploiement, elles se positionneront à l'emplacement indiqué et reviendront à l'Étape 1 du flux de travail.

FIGURE 12

Schémas de fonctionnement des plates-formes de contrôle UAV



4.4 Essais en vol des installations de radionavigation au sol dans les aéroports

On trouvera dans la présente section des renseignements sur les systèmes de contrôle des émissions UAV utilisés pour l'inspection et l'entretien des installations au sol de sécurité aérienne, par exemple le système d'atterrissage aux instruments (ILS)/le radiophare omnidirectionnel VHF dans les aéroports.

#### 4.4.1 Informations relatives aux systèmes

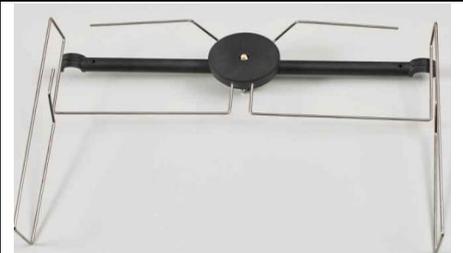
##### 4.4.1.1 Aéronef UAV

L'aéronef UAV est un produit commercial et est équipé d'appareils de mesure, tels que le dispositif de positionnement cinématique en temps réel (RTK) et l'altimètre de précision, afin d'obtenir des informations de localisation précises pendant les opérations. On trouvera ci-après certaines des spécifications de base relatives à ce dispositif.

	Dimensions globales	883,0 × 427,0 × 886,0 mm (déplié)
	Poids/capacité de charge utile max	4,91 kg (batterie incluse)/1,23 kg
	Distance de fonctionnement maximale	8 km
	Fréquence de fonctionnement	Commande: 2,4 GHz (2,400-2,483) Vidéo: 5,8 GHz (5,725-5,850)
	Précision de vol stationnaire	0,10 m dans le plan vertical (avec dispositif RTK) 0,10 m dans le plan horizontal (avec dispositif RTK)
	Résistance maximale au vent	12 m/s
	Vitesse horizontale maximale	81 km/h
	Plafond de vol	3 km
	Température de fonctionnement	-20 à 50° C
	Durée maximale de vol	<30 min (avec charge utile)
	Unité de mesure inertielle	Équipé
	Systèmes anticollisions	Vision (vers l'avant, vers le bas) IR (infrarouge, vers le haut/bas) Ultrason (vers le bas)

##### 4.4.1.2 Système de contrôle des émissions

La plate-forme de contrôle des émissions UAV est configurée pour recevoir les signaux des systèmes ILS/VOR. Plus précisément, elle se compose d'une antenne et d'un unique récepteur pour les signaux dans la bande de fréquences 108~118 MHz (pour les systèmes VOR et ILS) et dans la bande de fréquences 329~335 MHz (pour le système de radioalignement de descente (GS)). Il est important de tester l'antenne installée sur la plate-forme UAV pour comprendre le diagramme d'antenne global.

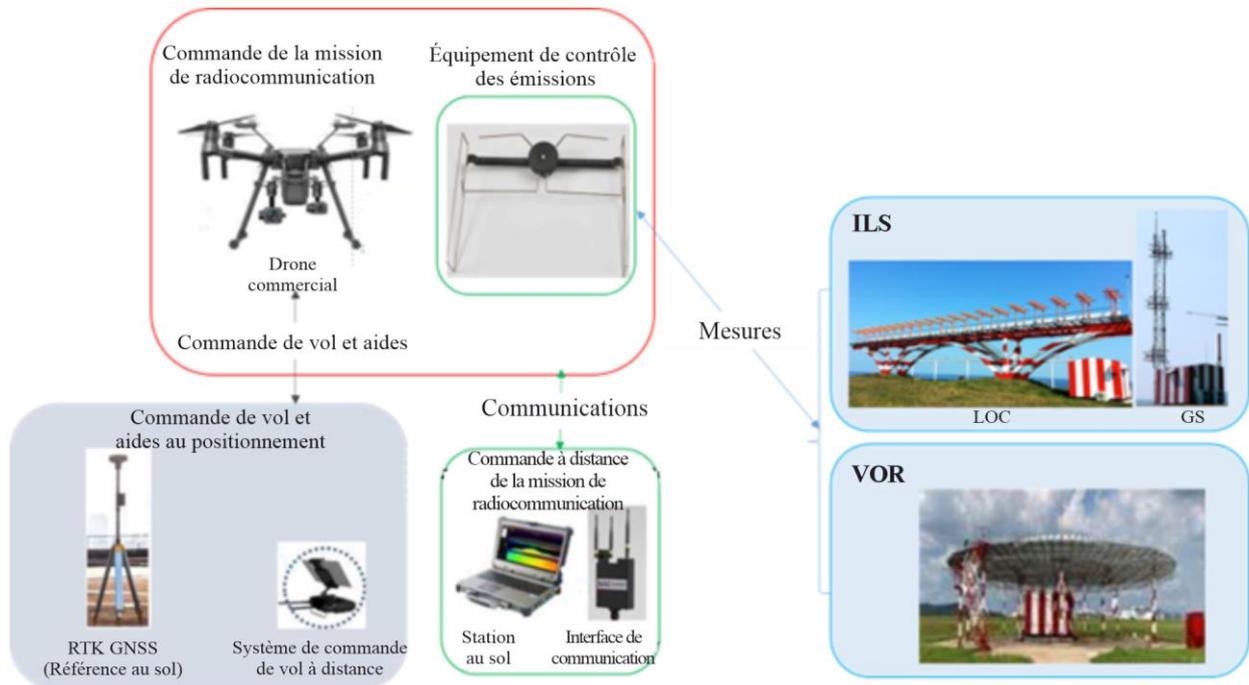
	Fréquence de fonctionnement 108~118 MHz (systèmes VOR/LOC) 329~335 MHz (système GS)
---	---

##### 4.4.1.3 Contrôle et opérations

La plate-forme UAV utilise les dispositifs installés pour mesurer les signaux des systèmes ILS/VOR à différents emplacements dans l'espace et transmet les données à la station de commande au sol. Étant donné que de nombreuses mesures doivent être faites en tenant compte des divers angles d'approche horizontale et verticale dans le processus d'atterrissage de l'aéronef, la plate-forme est conçue pour permettre des mesures automatisées en introduisant un trajet prédéterminé dans l'espace. La station de commande au sol contrôle le vol et la position de l'UAV, et effectue des mesures

conformément aux informations relatives à la mission de radiocommunication programmée. On trouvera dans la Figure 13 une brève présentation des composants nécessaires pour commander l'aéronef UAV, mesurer le signal et transmettre les résultats des mesures à la station de commande au sol.

FIGURE 13  
Configuration et fonctionnement du système

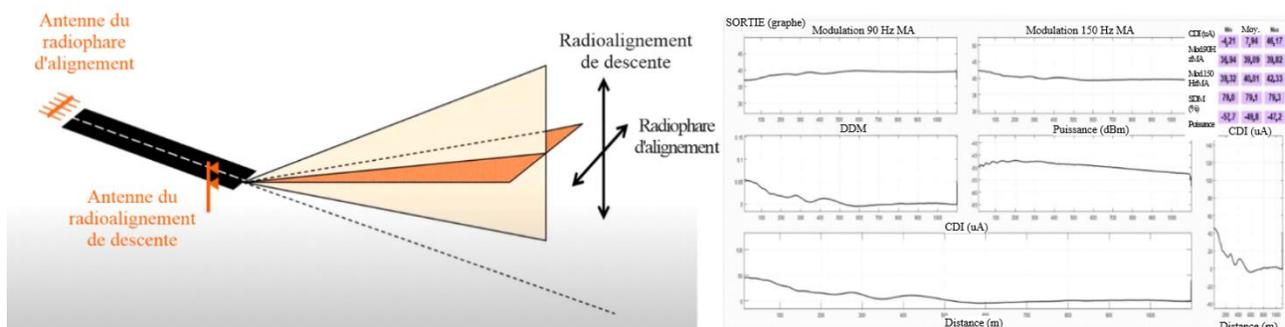


#### 4.4.2 Mesures et résultats

##### 4.4.2.1 Système ILS

Les mesures du système ILS visent principalement à vérifier que les signaux reçus à certains angles horizontal (par le système LOC) et vertical (par le système GS) sont conformes aux références, et que les données de mesures sont fournies par le biais d'une analyse. Les résultats du test sont présentés ci-après.

FIGURE 14  
Résultats du test du système ILS



### 4.4.2.2 Système VOR

Le radiophare omnidirectionnel à ondes métriques (VOR) est un système qui transmet des signaux de référence omnidirectionnels, ce qui permet à un équipement VOR à bord d'un aéronef d'indiquer la direction de l'emplacement de l'émetteur VOR pendant le vol. Le test du système VOR est réalisé sur une orbite circulaire autour de l'émetteur VOR, et consiste à enregistrer et évaluer la distribution réelle et mesurée des erreurs en azimut (par rapport à l'émetteur VOR) et la puissance des signaux reçus.

FIGURE 15

Résultats du test du système VOR

