

Drones civiles à usage professionnel

Rapport présenté en juin 2017
par

Charles HUBER

en vue de l'obtention du
Diplôme d'ingénieur spécialité informatique
option réseaux, systèmes et multimédia
(CYC14)

METHODS S.
9 Um Köpp, 7470 Söll, Luxembourg

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier chaleureusement ma compagne pour la patience dont elle a fait preuve durant toute la rédaction de ce rapport. Son travail de relecture fut une aide précieuse.

J'exprime une pensée toute particulière à mes deux filles, qui ont fait l'effort non négligeable de crier un peu moins fort pendant les heures où papa travaillait.

Merci à toutes les trois.

ABRÉVIATIONS

FPDC	Fédération Professionnelle du Drone Civile
DGAC	Direction Générale de l'Aviation Civile
SIA	Service d'Information Aéronautique
ULM	Ultra Léger Motorisé
MAP	Manuel d'Activité Particulière
DNC	Déclaration de Niveau de Compétence
CNIL	Commission Nationale de l'Informatique et des Libertés
ANRF	Agence Nationale de Fréquences
BTP	Bâtiments et Travaux Publics
SNCF	Société Nationale de Chemins de fer Français
UAV	Unmanned Air Vehicle
UAS	Unmanned Air System
CDMA	Code Division Multiple Access
CCD	Charge Coupled Device
SIM	Subscriber Identity Module
ESC	Electronic Speed Control
LiPo	Lithium Polymère
OSI	Open Systems Interconnection
MAC	Medium Access Control
LTE	Long Term Evolution
GNSS	<i>Global Navigation Satellite System</i>
IOT	Internet Of Things

SOMMAIRE

Introduction :	7
1.Drone : Définitions.....	8
1.1.Définition académique.....	8
1.2.Définition technologique.....	8
1.3.Définition juridique.....	8
2.La réglementation des drones à usages particuliers.....	8
2.1.Cadre de la réglementation appliquée aux usages particuliers.....	8
2.2.Les 4 scénarios opérationnels.....	9
2.2.1.Glossaire juridique et règles générales.....	9
2.2.2.Scénario S1 – Opération à vue en zone non peuplée.....	12
2.2.3.Scénario S2 – Opération hors vue en zone non peuplée.....	12
2.2.4.Scénario S3 – Opération à vue en zone peuplée.....	12
2.2.5.Scénario S4 – Opération hors vue étendue en zone non peuplée.....	13
2.2.6.Résumé :	13
2.2.7.Autres obligations opérationnelles.....	14
2.2.8.Conclusion.....	14
3.Evolution du marché en France et à l'international.....	15
3.1.1.Un démarrage en force.....	15
3.1.2.Evolution du marché.....	15
3.1.3.Un avenir dans la livraison aux particuliers ?.....	17
4.Les secteurs d'application actuels.....	18
4.1.Les 3 secteurs recensés par la FPDC :	18
4.1.1.Industrie.....	18
Les réseaux de transport et de distribution.....	18
BTP, mines et carrières.....	18
4.1.2.Agriculture.....	19
4.1.3.Audiovisuel.....	20
4.2.Autres exemples d'applications :	20
4.2.1.Secours.....	20
4.2.2.Surveillance.....	21
4.2.3.Sciences et environnement.....	21
4.2.4.Spectacles.....	22
4.2.5.Applications spécifiques.....	22
4.3.Conclusion.....	22
5.La technologie des drones.....	23
5.1.La notion de « système de drone ».....	23
5.1.1.Les stations au sol.....	23
La réception des données de navigation :	24
La réception des données de mesures.....	24
Conclusion.....	25
5.1.2.Les systèmes embarqués.....	25

Une carte de navigation :	26
Un GPS :	26
Une caméra :	26
Des modules de transmission et de réception:.....	27
Des capteurs de mesure.....	28
Les moteurs.....	28
Les batteries.....	28
Les architectures des systèmes embarqués.....	28
5.2.3 La charge utile.....	30
5.2.4 Les modes de transmissions.....	30
Émission radio directe.....	31
Émission radio Wi-Fi.....	31
Émission radio 4G.....	32
Positionnement par satellite.....	32
5.2. Les failles de sécurités.....	33
5.2.5 Les failles révélées.....	33
Icarus.....	33
Attaque sur l'AR Drone de Parrot.....	34
5.2.6 Les failles potentielles.....	34
5.3. Les types de drones et leur usage.....	35
5.3.1. Les drones à voilures fixes pour les scénarios S2 et S4.....	36
Caractéristiques.....	36
Cadre d'utilisation.....	36
5.3.2. Les drones à voilures tournantes pour les scénarios S1, S2 et S3.....	37
Les multicopters porteurs.....	37
Les multicopters simples.....	38
5.3.3. Analyse comparative des différents type de drones :	39
6. Les drones de demain.....	40
6.1. Les technologies en développement.....	40
6.1.1. La 5G et l'IOT.....	40
6.1.2. Intelligence artificielle et essaims de drones.....	41
6.2. Les enjeux sociétaux.....	41

DRONES CIVILES A USAGE PROFESSIONNEL

Introduction :

Le présent rapport a pour objectif de faire une analyse de la place actuellement occupée par les drones dans les applications professionnelles et d'émettre des hypothèses plausibles sur ses perspectives d'évolution. Après avoir identifié l'ensemble des aéronefs concernés par la définition du terme générique de « drone », on présentera le contexte législatif encadrant leur usage à des fins professionnelles.

Une analyse des études de marché réalisées nous aidera à estimer la place que ces nouveaux engins occupent dans l'économie nationale et internationale et à identifier les domaines où leur potentiel économique est attendu. Après avoir dressé un panorama des missions qu'ils sont capables de remplir à l'heure actuelle, une analyse technique de leur fonctionnement nous aidera à percevoir les risques et les avantages de leur utilisation, à l'aune des avancées technologiques.

Ce bilan nous permettra d'imaginer le rôle que les drones pourraient occuper dans la société de demain.

1. Drone : Définitions

1.1. Définition académique

« Petit avion télécommandé utilisé pour des tâches diverses (missions de reconnaissance tactique à haute altitude, surveillance du champ de bataille et guerre électronique) »¹

1.2. Définition technologique

« Aérodyne sans équipage, télépiloté ou programmé, utilisé pour des missions diverses »²

« Un aérodyne est le terme générique désignant tout aéronef dont la sustentation est principalement assurée par des forces aérodynamiques. Les aérodynes regroupent tous les appareils « plus lourds que l'air », dont la sustentation est assurée grâce à la portance d'une voilure fixe (avion, planeur) ou tournante (hélicoptère, autogire). »³

Dans la littérature, on retrouve très souvent le terme anglo-saxon UAV « Unmanned Air Vehicle » ou UAS « Unmanned Air System ».

1.3. Définition juridique

« Aéronef qui circule sans personne à bord »

« aéronef télépiloté »

2. La réglementation des drones à usages particuliers

2.1. Cadre de la réglementation appliquée aux usages particuliers

L'apparition des drones sur le marché civil a été rapide, mais comme souvent en matière de technologie, la conception d'un arsenal législatif et juridique est beaucoup plus lente que l'évolution de la technologie concernée. Certains pays comme la Suède, proscrirent totalement l'usage des drones sur leur territoire. Il est difficile de dire, s'il s'agit d'un choix purement politique, ou si l'effort législatif nécessaire joue un rôle dans ces dispositions.

On peut considérer que les drones civiles sont utilisés sur le territoire Français depuis 2012. Pourtant, la première loi encadrant leur utilisation a été votée en octobre 2016 et l'entrée en vigueur de certains de ses articles n'est prévue que pour l'année 2018. Cela témoigne du

1 Définition Larousse: <http://www.larousse.fr>

2 Wiktionary: <https://fr.wiktionary.org>

3 Wikipedia: <https://fr.wikipedia.org>

retard de la législation sur la technologie en général et de la difficulté d'encadrer son utilisation.

Malgré tout, pour ne pas bloquer le développement d'un secteur économique tout entier, l'usage des drones a été régulé par la publication au Journal Officiel dès 2012, de deux arrêtés gouvernementaux. Un arrêté « *relatif à la conception, à l'utilisation des drones et aux qualifications de leurs télépilotes* » et un arrêté « *relatif aux conditions d'insertion des drones dans l'espace aérien* ». Ces deux arrêtés ont subi deux modifications avant l'apparition de la loi et définissent l'essentiel de la réglementation actuellement en cours. On peut trouver un résumé de l'historique de la législation sur les drones sur le site de la Fédération Professionnelle du Drone Civile (FPDC)⁴.

Les règles d'utilisation ne sont pas les mêmes s'il s'agit d'un usage de loisir ou d'un usage professionnel. Dans le premier cas, la réglementation considère qu'il s'agit d'une pratique de l'aéromodélisme. Dans le second cas, elle le définit comme une activité particulière. Les possibilités d'utilisation d'un drone pour une activité particulière sont plus importantes mais elles sont également plus exigeantes en terme d'obligations.

Compte tenu du caractère inabordable des textes législatifs pour un non initié au droit, le ministère du développement durable et la Direction Générale de l'Aviation Civile (DGAC) ont rédigé et publié deux guides très complets, afin que les citoyens puissent facilement appréhender les règles appliquées à sa pratique. On peut se procurer le « *Guide aéromodélisme, modèles réduits et drones de loisir* »⁵ et le « *Guide 'Aéronefs circulant sans personne à bord : activités particulières' v1.2* »⁶.

Le présent document détaillera un résumé du guide relatifs aux activités particulières, car ce sont celles qui encadrent l'usage professionnel des drones.

2.2. Les 4 scénarios opérationnels

2.2.1. Glossaire juridique et règles générales

Dans un premier temps, afin de faciliter la compréhension du guide, il est important de préciser certains termes qu'il utilise :

4 Evolution de la législation Française concernant les drones : <http://www.federation-drone.org/les-drones-dans-le-secteur-civil/la-reglementation-francaise/>

5 Guide aéromodélisme : <http://www.developpement-durable.gouv.fr/sites/default/files/Guide%20a%C3%A9romod%C3%A9lisme%2C%20mod%C3%A8les%20r%C3%A9duits%20et%20drones%20de%20loisir.pdf>

6 Guide activités particulières : <http://www.developpement-durable.gouv.fr/sites/default/files/Guide%20Activit%C3%A9s%20particuli%C3%A8res%20v1.2%2010jan17.pdf>

Zone peuplée	Un aéronef évolue en zone peuplée lorsqu'il est à moins de 50 mètres d'une agglomération ou à moins de 150 mètres d'un rassemblement de personnes. Il s'agit de distances horizontales.
Agglomérations	Les agglomérations considérées sont celles figurant sur les cartes aéronautiques mises à disposition par le Service d'information aéronautique (SIA).
Rassemblement de personnes	Attroupement de plusieurs dizaines de personnes.
Survol de tiers	<p>Une personne étrangère à la mission, se trouve dans une zone d'exclusion située en dessous du drone. La surface de la zone d'exclusion dépend de la longueur du câble de retenue dans le cas d'un drone captif. Elle a un rayon de 30 mètres autour de l'aéronef si celui-ci est libre.</p> <p>Attention: Il ne faut pas confondre le survol de tiers avec le vol en zone peuplée. Survoler un ou deux individus isolés n'est pas considéré comme un vol en zone peuplée. De plus, comme on le verra plus tard, les vols en zones peuplées ne permettent jamais le survol de tiers.</p>
Vol en vue	Le pilote a une vue dégagée et directe (aucun dispositif optique) sur l'aéronef.
Vol en immersion	Le pilote porte des lunettes affichant les images de la caméra embarquée sur le drone.
Aptitude théorique	Le pilote a un certificat théorique de pilote civile ou militaire. C'est l'équivalent du code la route pour les airs. Il s'agit généralement d'un certificat ULM (Ultra Léger Motorisé).
Attestation de compétence	Attestation de compétence délivrée par la DGAC après une épreuve pratique. Elle n'est valable que pour un type d'aéronef.
Licence de pilote	Licence de pilote de planeur, d'avion ou d'hélicoptère avec au moins 100 heures de vol en tant que commandant de bord.
Attestation de conception	<p>Une attestation de conception est délivrée par la DGAC qui atteste que l'aéronef est conforme à la réglementation. Dans le cas de l'achat d'un drone neuf ou d'occasion, l'attestation doit être délivrée par le revendeur. Pour les modèles fabriqués en série, on parlera d'une attestation de conception de « type ».</p> <p>Elle sert par exemple à attester de la présence d'un équipement de protection des tiers. C'est-à-dire d'un parachute ou d'un mode d'atterrissage automatique d'urgence. Un grand nombre d'autres exigences de ce type doivent être respectées.</p>

Tableau 1: glossaire pour le guide relatif aux activités particulières

La réglementation sur les drones s'applique à tous les aéronefs dont le poids est inférieur à 150kg. Au-delà de cette masse, une réglementation européenne entre en vigueur. Quatre scénarios opérationnels sont considérés. Chacun de ces scénarios définit un cadre d'utilisation, qui est déterminé à la fois par l'environnement dans lequel évolue le drone et par la distance qui sépare le drone du pilote.

Certaines obligations sont communes à l'ensemble des scénarios, d'autres sont spécifiques à chacun. Toute utilisation qui serait effectuée en dehors du cadre défini par un de ces scénarios doit faire l'objet d'une demande particulière sur dossier.

Le guide législatif concerne l'ensemble des aéronefs ; il comprend les aérostats (les ballons) et les aéroplanes (les drones). Il fait certaines distinctions en fonction de ces deux types d'engins. Les points qui concernent les aérostats ne seront pas mentionnés dans ce rapport.

On peut isoler les obligations générales suivantes :

- L'exploitant doit déclarer son activité à la DGAC et renouveler sa déclaration tous les deux ans.
- L'exploitant doit être en possession d'un dossier appelé MAP (Manuel d'Activité Particulière), qui décrit son activité et comment il répond aux obligations légales qui sont imposées par sa pratique.
- Le drone doit avoir une plaque avec le nom et l'adresse de l'exploitant.
- Le pilote a obligatoirement une aptitude théorique (certains scénarios imposent en plus une attestation de compétence).
- L'exploitant doit être en possession d'une déclaration de niveau de compétence pour chacun des télépilotes (DNC).
- Dans le cas des scénarios opérationnels permettant exclusivement le vol en vue, il est possible de piloter en immersion, si et seulement si, une autre personne garde constamment le drone en vue directe. C'est cette personne qui est alors responsable en cas d'accident.
- A l'exception du scénario S4, le survol de tiers étranger à la mission est toujours interdit.
- Le vol de nuit est interdit, sauf dérogation.
- Les drones doivent être équipés de feux lumineux et s'il est nécessaire, le câble de retenue doit être recouvert d'éléments de signalisation.

2.2.2. Scénario S1 – Opération à vue en zone non peuplée

Le scénario S1 détermine l'usage des aéronefs en zone non peuplée lorsque le pilote est à moins de 200 mètres du drone. C'est le scénario le plus permissif car c'est le moins dangereux. A l'exception de l'altitude, il n'impose pour les drones de moins de 25kg, aucune autre obligation que celles imposées par le cadre général :

- Si le drone fait plus de 25kg, le pilote doit détenir une attestation de compétence en plus de son aptitude théorique et l'exploitant doit être en mesure de fournir une attestation de conception pour le drone employé.
- Quelle que soit la masse du drone, le vol est limité à une altitude de 150 mètres.

2.2.3. Scénario S2 – Opération hors vue en zone non peuplée

Le scénario S2 détermine l'usage des aéronefs en zone non peuplée lorsque le pilote est à moins de 1km du drone (s'il est à moins de 200 mètres, il est couvert par le scénario S1). L'engin peut être piloté hors vue mais l'interdiction de survoler des tiers est maintenue. Il est donc particulièrement contraignant d'un point de vue opérationnel et exigeant d'un point de vue législatif :

- Dans tous les cas, l'exploitant doit être en mesure de fournir l'attestation de conception.
- Si le drone fait plus de 25kg, le pilote doit détenir une attestation de compétence en plus de son aptitude théorique.
- L'altitude maximale est de 150 mètres pour les drones de moins de 2kg et de 50 mètres pour les autres.

2.2.4. Scénario S3 – Opération à vue en zone peuplée

Le scénario S3 détermine l'usage des aéronefs en zone peuplée lorsque le pilote est à moins de 100 mètres du drone. Bien qu'il ne permette pas le vol de tiers, c'est le seul scénario qui couvre l'utilisation d'un drone en agglomération.

- Si le drone fait plus de 2kg, une attestation de conception est obligatoire.
- Si le drone fait plus de 8kg, le drone doit être captif. C'est à dire relié à un câble.
- Si le drone fait plus de 25kg, le pilote doit détenir une attestation de compétence en plus de son aptitude théorique.
- Dans tous les cas, l'altitude maximale est de 150 mètres.

2.2.5. Scénario S4 – Opération hors vue étendue en zone non peuplée

Le scénario S4 détermine l'utilisation des drones en zone non peuplée, sans limite de distance entre le pilote et le drone. C'est le seul cadre opérationnel qui permette le survol de tiers. C'est par conséquent celui qui est le plus exigeant d'un point législatif :

- Le drone ne peut pas peser plus de 2kg.
- Une attestation de conception est obligatoire.
- Le pilote doit détenir une licence de pilote et pouvoir témoigner d'une expérience pratique sur le drone concerné.
- En plus du MAP, l'exploitant doit délivrer un dossier par opération à la DGAC.
- L'altitude maximale est de 150 mètres.

2.2.6. Résumé :

Bien qu'il ne couvre pas tous les cas de figure précédemment cités (pas de mention des obligations administratives, ni des permissions relatives au survol des tiers), le schéma mis en ligne par AETOS⁷, donne une bonne vision générale du cadre opérationnel de chaque scénario :



Illustration 1 : résumé du cadre opérationnel de chaque scénario

7 AETOS Cluster Drone : <http://www.aetos-aquitaine.fr/p1-2-10-reglementation.html>

2.2.7. Autres obligations opérationnelles

En dehors des obligations relatives à la sécurité des vols, on trouve les obligations générales suivantes :

- L'interdiction de transporter des produits dangereux.
- L'interdiction de répandre des produits phytopharmaceutiques, sauf en cas d'urgence sanitaire. Il s'agit d'une interdiction générale de traiter les cultures par voie aérienne. L'usage des drones pour les traitements agricoles est donc interdite.
- L'utilisation d'une caméra doit se faire en respect de la vie privée et des règles imposées par la CNIL (Commission Nationale de l'Informatique et des Libertés).
- La loi prévoit l'obligation de procéder à un enregistrement informatique de tous les drones de plus de 800 grammes.
- Les émissions radios doivent être émises sur des bandes de fréquences libres dans la limite des puissances autorisées. Il faut se reporter au tableau national des fréquences publié par l'ANRF⁸ (Agence Nationale de Fréquences).

2.2.8. Conclusion

La première lecture du guide sur la pratique des drones à usage professionnel laisse l'impression d'une législation compliquée qui donne peu de marge de manœuvre à une exploitation commerciale. Après une seconde lecture, on peut cependant tirer deux conclusions. Le guide est clair et extrêmement précis. Il ne laisse aucune place au doute. La transcription des textes de loi en un résumé lisible et complet témoigne d'une réelle volonté de rendre accessible la pratique du drone à n'importe qui. La décomposition en scénarios opérationnels donne l'impression d'être inspiré par des pratiques déjà déterminées. On peut penser que ces textes ont été rédigés en collaboration étroite avec les professionnels du secteur. La FPDC revendique être un interlocuteur privilégié de son autorité de tutelle. En reconsidérant le guide sous cet angle, on constate qu'il s'agit d'un recadrage sécuritaire pour des scénarios opérationnels taillés sur mesure et qu'il ne limite en rien l'exploitation du drone à usage professionnel.

On peut en déduire qu'il y a une réelle volonté des pouvoirs publics de développer cette nouvelle économie. En témoigne la rapidité avec laquelle les premiers arrêtés gouvernementaux ont été publiés, sans attendre qu'arrive à terme un processus législatif beaucoup plus lent. Il semblerait que la stratégie soit payante étant donné l'évolution du marché en France.

8 Tableau national des fréquences : <http://www.anfr.fr/gestion-des-frequences-sites/le-tnrbf/>

3. Evolution du marché en France et à l'international

3.1.1. Un démarrage en force

Le marché du drone en France a démarré dès 2012 avec la publication des premiers arrêtés encadrant sa pratique. Une telle réactivité face à l'apparition de cette nouvelle technologie a permis une forte croissance du marché et un bon positionnement de la France à l'international. Le constructeur « Drone Volt⁹ », l'un des leader Français dans le domaine, a publié une infographie qui mentionne un marché passé en France de 62 Millions d'Euros en 2012 à 288 Millions d'Euros en 2015. Le constructeur positionne la France comme un des pays où la pratique du drone est la plus développée.

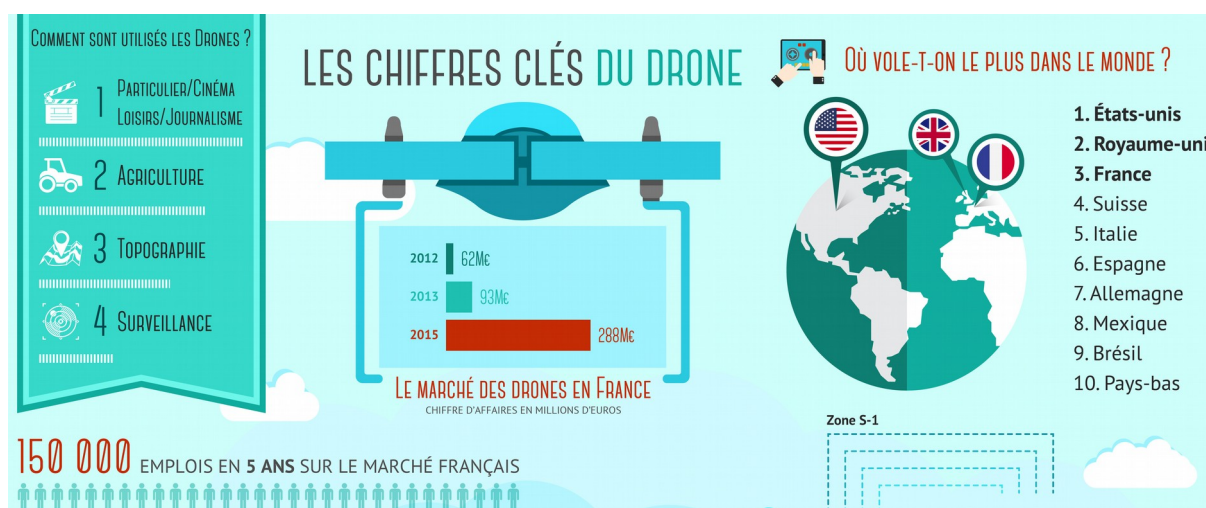


Illustration 2 : évolution du marché des drones civils en France

Une très grosse part du marché est concernée par les drones de loisirs. L'utilisation professionnelle est quant à elle très cantonnée à l'agriculture et à la prise de vue pour les médias et le cinéma. Si l'on en croit les deux études menées par les sociétés de conseils « Gartner¹⁰ » et « Oliver Wyman¹¹ », le marché va continuer à progresser mais sa distribution va être bouleversée.

3.1.2. Evolution du marché

« Gartner » publie un chiffre d'affaire mondial pour les drones de 4,5 Milliards de dollars en 2016 avec 2,1 Milliards d'unités produites. La société de conseils estime un gain de +34 % en 2017 avec un chiffre d'affaire de 6 Milliards de dollars et 3 Milliards d'unité produites.

9 Infographie Drone Volt : <http://www.dronevolt.com/fr/les-chiffres-cles-du-drone-linfographie/>

10 Résumé de l'étude Gartner : <http://www.gartner.com/newsroom/id/3602317>

11 Article de Usine Nouvelle sur l'étude de Oliver Wyman : <http://www.usinenouvelle.com/article/infographie-le-marche-francais-des-drones-civils-pourrait-depasser-650-millions-d-euros-en-2025.N381962>

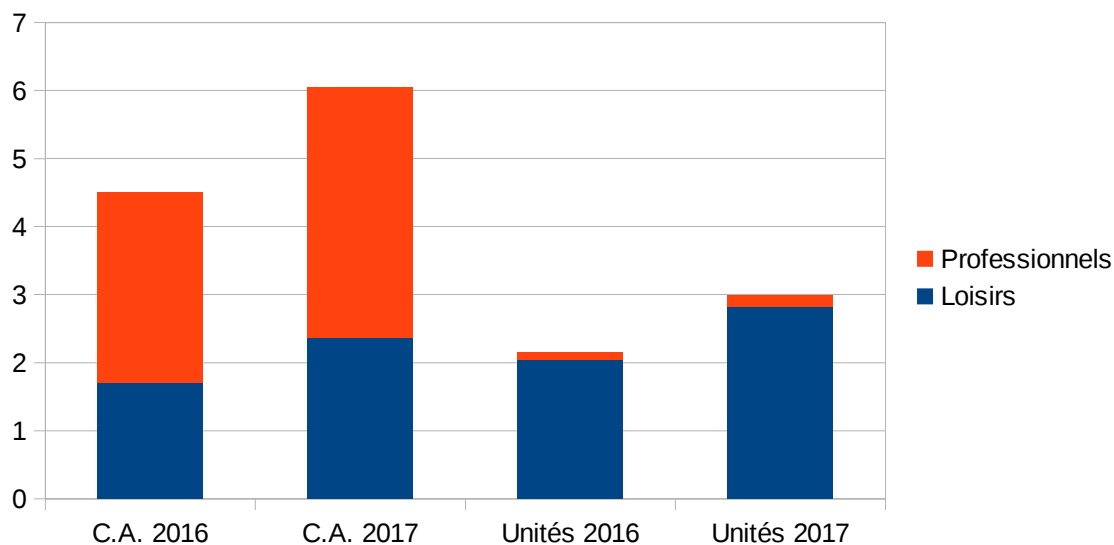


Illustration 3 : marché mondial actuel des drones civil (Gartner)

Toujours selon la même société, l'agriculture de précision représente pour le moment la plus grosse part de marché dans l'usage des drones professionnels. Elle estime que cette position n'a pas vocation à perdurer si on considère les faibles moyens du secteur et la faible valeur ajoutée qu'apporte les drones par rapports aux avions et aux satellites. Alors que le secteur est leader aujourd'hui, la société de conseils lui prédit une part de marché mondial de 7 % à l'horizon 2020. S'il partage le même diagnostic, le cabinet « Oliver Wyman » est plus optimiste concernant l'usage des drones dans l'agriculture en France, où il lui prédit une part de marché de 28 % en 2025.

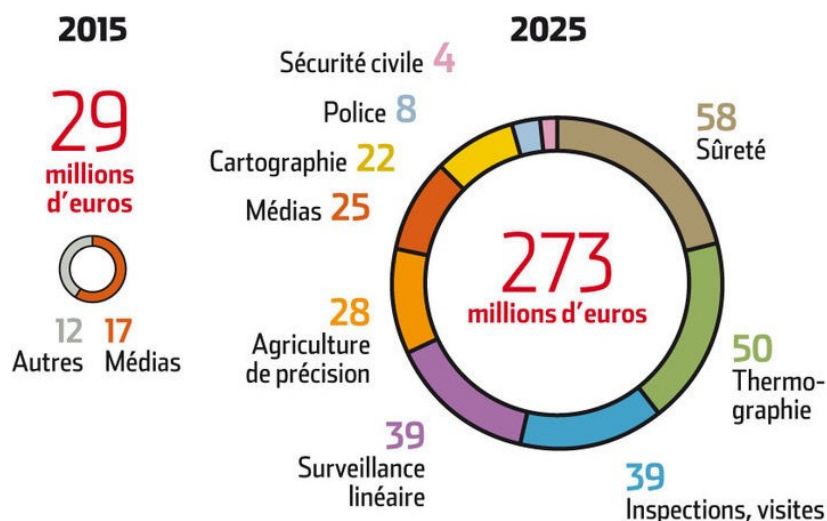


Illustration 4 : parts de marché des drones professionnels en France à l'horizon 2025 (www.usinenouvelle.com)

Selon les deux cabinets de conseils, la distribution du marché professionnel à vocation a se répartir sur les différents secteurs avec une prédominance dans le domaine de l'inspection et de la thermographie.

Ils prédisent également un glissement des compétences. Selon eux, d'après la forte progression des avancées technologiques, les drones professionnels n'auront plus de valeur ajoutée technique par rapport aux engins de loisirs. Cette baisse des coûts va favoriser l'usage des drones mais va forcer les constructeurs d'engins professionnels à proposer une plus-value dans le traitement des données et les logiciels associés.

3.1.3. Un avenir dans la livraison aux particuliers ?

Une forte campagne de communication a été menée concernant le possible usage des drones pour effectuer des livraisons aux particuliers. Un engouement médiatique a laissé penser que cette technologie était imminente. Il semblerait que cette projection soit complètement injustifiée.

Avec la législation actuelle dans tous les pays permettant le vol de drones et au vu de la rentabilité hypothétique d'un tel service, « Gartner » estime qu'une telle utilisation ne pourrait être appliquée qu'à un usage interne au sein d'une entreprise. Il lui prédit une part de marché de 1 % à l'horizon 2020.

4. Les secteurs d'application actuels

4.1. Les 3 secteurs recensés par la FPDC :

4.1.1. Industrie

La FPDC définit deux sous domaines de l'industrie, que sont les réseaux de transport et de distribution et les BTP associés à l'exploitation des mines et des carrières.

Les réseaux de transport et de distribution

La particularité des réseaux de transport (réseau ferré) et de distribution (électricité, eau, gaz) est qu'ils ont une infrastructure étendue, qu'il est difficile de surveiller à des fins de maintenance ou de vigilance. L'usage des drones dans le cadre d'un scénario opérationnel S4, permet de faire une inspection de l'infrastructure plus facilement et plus rapidement qu'avec l'usage d'un avion ou d'un hélicoptère. La caméra intégrée au drone pourra faire une inspection visuelle ou une inspection infrarouge ; la thermographie permettant de révéler des défauts non visible à l'œil nu.

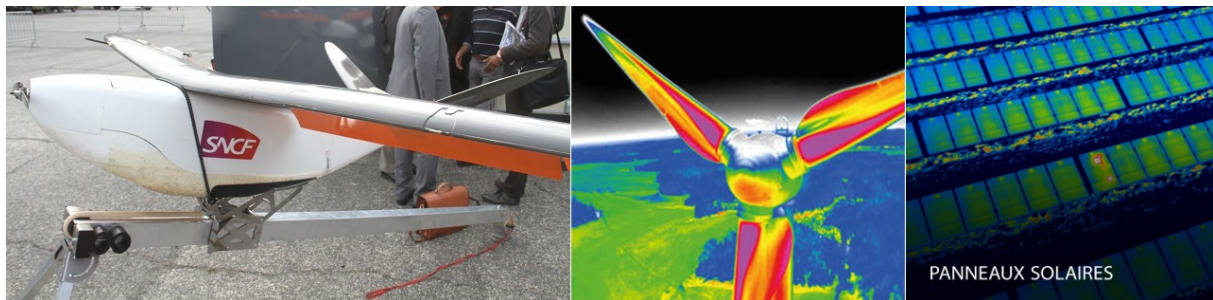


Illustration 5 : drone SNCF et exemples de recherche de défaut par thermographie

BTP, mines et carrières

Dans le bâtiment, la thermographie par drones est également utilisée pour révéler des fuites d'isolation sur des constructions. Ils permettent également de faire une inspection visuelle des stocks et des suivis de chantier. Cependant, on les utilise majoritairement pour faire de la topographie, de la cartographie, du calcul de cubature et de la modélisation 3D. Derrière toutes ces applications, il n'y a qu'une seule technique appelée la photogrammétrie.

Cette technique consiste à reconstituer un modèle virtuel de l'environnement en 3 dimensions, grâce à une succession de photos prises depuis des points différents. En appliquant le principe de la stéréoscopie on peut reconstituer le relief de la cible et réaliser des calculs de volumétrie. Plus simplement, il est possible de réaliser des cartes en 2 dimensions. C'est alors ce que l'on appelle de l'orthophotographie.

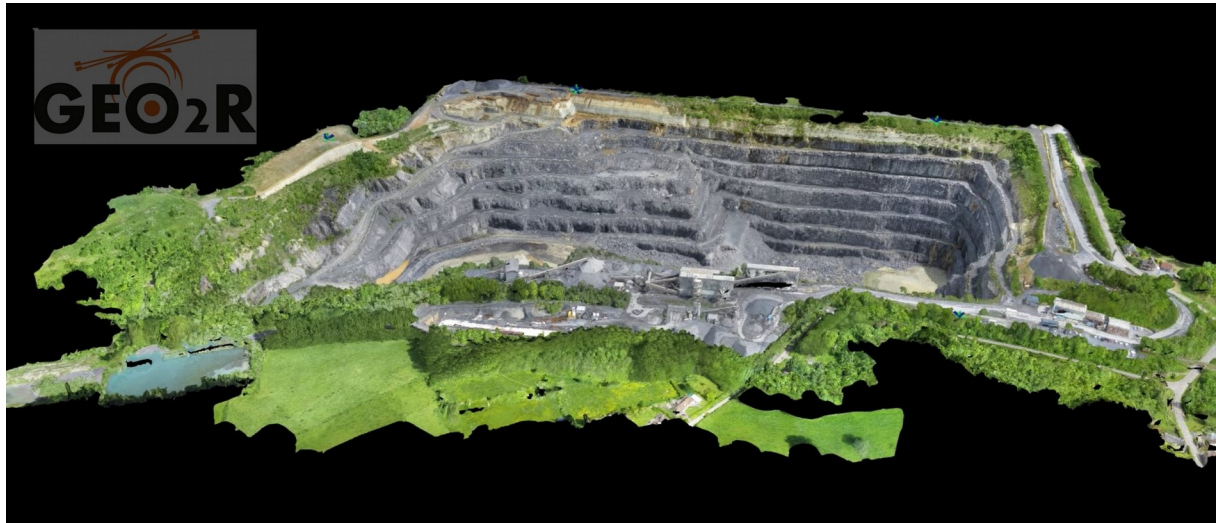


Illustration 6 : modélisation d'une carrière réalisée par photogrammétrie (société Geo2R)

4.1.2. Agriculture

L'utilisation la plus évidente des drones pour l'agriculture est l'épandage de produits phytopharmaceutiques sur les cultures. Toutefois, il n'est plus possible de le faire car comme nous l'avons vu, l'épandage par voie aérienne a été interdit en France depuis une loi du 17 août 2015, sur la transition énergétique et la croissance verte. Le traitement du mildiou sur certaines vignes Alsaciennes fait exception.

Les drones sont donc majoritairement utilisés pour faire de l'agriculture de précision. Grâce à la thermographie, ils peuvent mesurer le taux de chlorophylle ou les besoins en azote, afin de mieux répartir les engrais. Cette technique permet d'optimiser l'irrigation en faisant une estimation du stress hydrique, grâce à la réflectance des sols. Ces informations renseignent sur le meilleur moment de récolter.

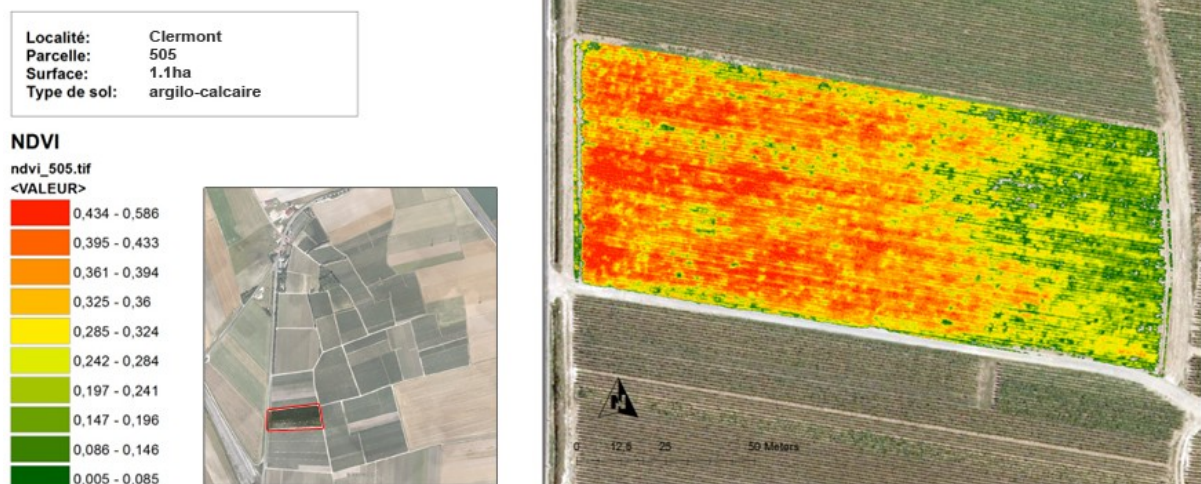


Illustration 7 : exemple d'un relevé de Vigueur Végétal publié par Drones Imaging

4.1.3. Audiovisuel

Les drones sont très utilisés dans les médias et le cinéma. Les cinémas de fiction ou de documentaire les utilisent principalement pour réaliser des prises de vues originales, qui pourraient difficilement être réalisées par d'autres moyens. Leur utilisation dans les médias d'informations permet par exemple de couvrir rapidement des zones inaccessibles, sinistrées par des catastrophes naturelles.



Illustration 8 : prise de vue en zone inaccessible (Photo de Fred Ripert)

4.2. Autres exemples d'applications :

4.2.1. Secours

La rapidité et la facilité de déploiement des drones en font un acteur privilégié pour la gestion des situations d'urgence. Par exemple, les drones sont de plus en plus utilisés par les pompiers qui peuvent grâce à eux obtenir des informations sur la progression des feux, la direction du vent et les endroits stratégiques d'intervention. Le prototype d'un drone défibrillateur se déplaçant à plus de 100km/h et permettant la visualisation de la scène par une équipe médicale distante, représente bien le potentiel des drones en matière de gestion de crise.



Illustration 9 : drone ambulance de Alec Momont et drones pompiers

4.2.2. Surveillance

La surveillance de sites industriels ou la surveillance des frontières est également un domaine où le drone fait son intrusion. Les drones de surveillance sont conçus pour effectuer des rondes comme des agents de sécurité humains. Une fois leur ronde terminée, ils retournent à leur station de recharge. Les images sont envoyées en temps réel à un agent de sécurité. Les drones sont appelés automatiquement par le déclenchement d'une détection d'intrus électronique en un point précis. Ils fournissent donc une aide d'appoint à la sécurité sur les sites étendus.



Illustration 10 : site sous la surveillance de la société Drone Protect System

4.2.3. Sciences et environnement

Les drones sont également utilisés par des centres de recherche pour faire des mesures atmosphériques à basse altitude. Ils sont plus faciles à déployer que des ballons et permettent d'analyser des couches atmosphériques jusque-là moins connues. Actuellement le Centre National de Recherches Météorologiques (CNRM) conduit deux projets de recherche européens (MIRIAD¹² et BACHUS¹³) dans l'optique de déterminer l'effet des aérosols sur le changement climatique.



Illustration 11 : drone de mesure atmosphérique utilisé dans le cadre du projet MIRIAD

12 MIRIAD : <http://www.meteofrance.fr/actualites/30601463-innovation-des-drones-pour-mieux-connaître-l-atmosphere>

13 BACCHUS : <http://www.meteofrance.fr/actualites/22577295-video-des-mini-drones-instrumentes-pour-la-recherche-en-meteorologie>

4.2.4. Spectacles

La facilité avec laquelle on peut faire évoluer les drones dans les airs évoque naturellement quelque chose de magique. C'est donc tout naturel qu'on les voit apparaître dans des chorégraphies ou dans des spectacles sons et lumière d'un tout nouveau genre.



Illustration 12 : cirque du soleil, son et lumière Intel et spectacle "Shadow"

4.2.5. Applications spécifiques

A côté de ces applications dans des domaines très généraux, certains drones sont utilisés pour des missions très spécifiques. On peut citer, par exemple, leur utilisation par des agences immobilières de luxe qui peuvent grâce à eux améliorer la qualité des vidéos de présentation des biens immobiliers. Les drones entrepôts, munis d'un scanner de codes barres pour inventorier les stocks, sont un autre exemple de ces utilisations particulières.



Illustration 13 : drone entrepôt "Eyesees" de la société Hardis

4.3. Conclusion

Depuis leur apparition sur le marché professionnel, les drones ont trouvé un grand nombre d'applications différentes. Il est difficile de savoir s'ils réussiront à s'implanter dans de nouveaux domaines ou s'ils ont déjà occupé tout l'espace qu'ils pouvaient investir. Peut-être que l'évolution de leur technologie ouvrira de nouvelles voies et élargira encore d'avantage leur présence dans le marché professionnel.

5. La technologie des drones

Le fort développement de la technologie des drones est un phénomène récent et leur utilisation est encore limitée par rapport au potentiel d'utilisateurs. Les drones professionnels sont souvent construits par des industriels qui ne dévoilent pas, à raison, leurs secrets de fabrication (les notions de sécurité seront abordées plus tard). Par ailleurs, leur coût élevé ne permet pas de s'en procurer un exemplaire pour faire une analyse technique de son fonctionnement. Même si cela était possible, les façons de concevoir un aéronef sont tellement multiples que le résultat de cette analyse ne serait exhaustif que pour l'engin étudié. En contrepartie, on constate que les drones de loisirs recouvrent une grande partie des fonctionnalités offertes par leurs équivalents professionnels. Ils sont quant à eux largement disséqués, manipulés et reconfigurés. Aussi bien certains fabricants que la communauté de passionnés, fournissent littératures et outils en abondance^{14 15} permettant de se livrer à une étude détaillée. On peut y apprendre comment construire un drone et utiliser un logiciel de pilotage open source de qualité¹⁶. C'est donc grâce à une étude des fonctionnalités communes aux drones de loisirs et aux drones professionnels que l'on va pouvoir faire une analyse fonctionnelle technique. Le champ technologique couvert est toutefois trop large et trop varié pour faire une étude précise. On se contentera donc d'aborder la conception des drones sous un angle fonctionnel.

5.1. La notion de « système de drone »

Un drone n'est pas un engin autonome. Il fait partie d'un ensemble plus complet que l'on nomme un système de drone ou UAS.

Ce système comprend l'ensemble des éléments qui participent au vol contrôlé du drone. Il est composé : d'un aéronef (ou drone), de la charge utile portée (outil embarqué), d'une station de contrôle au sol, d'un pilote et d'un medium de communication entre le drone et la station.

5.1.1. Les stations au sol



Illustration 14 : différents types de stations au sol

14 Dossier technique de l'AR DRONE : www.dmseducation.eu/systeme-ardrone-pdf-837.html

15 Fabriquer un drone pour moins de 200 Euros: <https://www.mondrone.net/monter-un-quad-racer-pas-cher/>

16 Site d'initiation à la conception des drones de loisirs: <http://ardupilot.org/copter/docs/introduction.html>

La réception des données de navigation :

La station au sol a en charge la communication avec le drone. Son rôle principal est d'échanger avec l'aéronef les données utiles au contrôle de sa navigation. La station transmet au drone les commandes de direction et de vitesse. En retour, elle peut recevoir de l'engin des informations de navigation telles que les coordonnées GPS, l'altitude ou l'orientation. Les données de navigation, que l'on appelle télémétrie, sont véhiculées grâce à un protocole dédié nommé MAVLink.

Il est important de distinguer les données de contrôle qui véhiculent les commandes de direction, des données de navigation renvoyées par le drone qui informent sur sa position. Ces deux types de données transitent souvent sur des canaux différents.

On peut distinguer deux cas d'utilisation pour le contrôle d'un drone via une station au sol.

Programmation d'un plan de vol :

Il s'agit d'une infrastructure où la station au sol est plus qu'un simple module de commande mais est un ordinateur complet. Elle est composée d'un ensemble matériel et logiciel permettant l'élaboration d'un plan de vol. Cet ensemble est nécessairement composé d'une interface Homme-Machine évoluée et d'une suite logicielle nécessitant une certaine puissance de calcul.

Contrôle du drone en direct :

C'est la configuration que l'on retrouve dans les manipulations de type « modélisme ». Même si elle est disponible sur les stations lourdes, elle convient aux stations légères et ergonomiques. Dans le cas d'une utilisation professionnelle, elle va être utilisée pour faire évoluer le drone dans des environnements complexes qui nécessitent la vigilance constante d'un opérateur. Celui-ci va généralement utiliser une station capable de recevoir et d'afficher les données de navigation renvoyée par le drone. Dans la majorité des cas, les images renvoyées par une caméra embarquée vont également servir de données de navigation et la station aura un moniteur vidéo en plus de son module de contrôle.

La réception des données de mesures

Contrairement au modélisme, l'usage professionnel d'un drone ne consiste pas à le faire voler pour le plaisir de le regarder évoluer dans les airs. A l'exception des cas où un drone est utilisé pour un travail en altitude, il est très souvent envoyé dans le ciel pour récolter des données et les transmettre à la station au sol, qui va les traiter et les analyser. Il peut s'agir de tout type de données mesurées à l'aide de capteurs, comme par exemple un taux de pollution ou un taux d'humidité. Ce sont très fréquemment des relevés thermographiques réalisés à l'aide d'une caméra infrarouge ou des prises de vue pour de la photogrammétrie. L'intégration de ces données nécessitent de la mémoire et de la puissance de calcul qui peuvent difficilement être incluses au système embarqué d'un drone. Leur traitement va donc nécessiter une station au sol de type ordinateur.

Conclusion

Un dispositif professionnel ne se limitera jamais à un drone piloté avec une simple commande manuelle. La configuration la plus légère comprendra au minimum un moniteur capable d'afficher les images filmées par le drone et un module d'enregistrement capable de les sauvegarder. On trouvera cette configuration dans un nombre réduit de cas d'utilisation, comme le travail en altitude ou les inspections visuelles en environnement non dégagé.

Dans tous les autres cas, la station au sol aura besoin d'une puissance de calcul nécessaire à la programmation d'un plan de vol et/ou nécessaire à l'intégration et à l'analyse des mesures renvoyées par le drone.

5.1.2. Les systèmes embarqués

La différence majeure entre le modélisme et la pratique du drone (même pour le loisir) réside dans la présence obligatoire d'un système embarqué dans ce dernier. Pour des raisons de sécurité et de possibilité physique de navigation, la réception des commandes ne peut pas être directement reliée à la puissance mécanique comme illustré sur le schéma suivant¹⁷ :

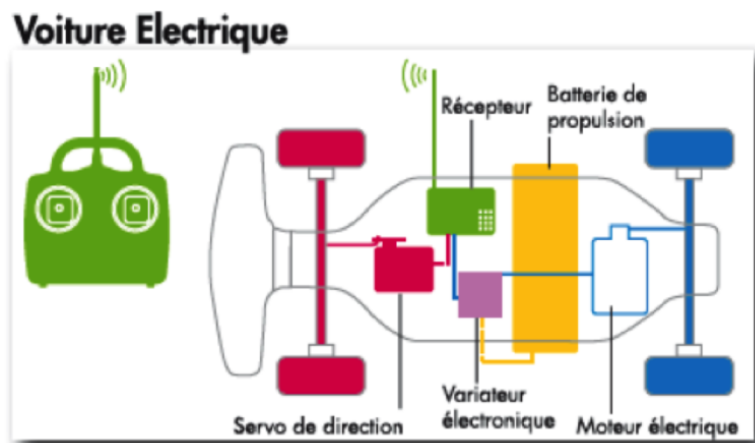


Illustration 15 : organes d'un module de contrôle élémentaire

Un système embarqué de drone contient de facto un ensemble électronique composé de plusieurs éléments, qui assurent la sécurité de son vol et lui permettent une autonomie en cas de repos du pilote ou de perte de lien avec la station au sol. Le drone est stabilisé automatiquement s'il ne reçoit aucune commande et est capable d'atterrir tout seul si un problème technique survient.

Le système embarqué contient également tous les capteurs de mesure qui justifient son utilisation et dont les données sont encodées et compressées pour leur envoi à la station au sol.

¹⁷ Détail d'un système Radio Commandé basique : <http://wollef.org/fr/voitures-rc-le-fonctionnement-de-la-telecommande-et-du-recepteur/>

Certaines fonctionnalités comme le « tracking » (suivi d'une cible en mouvement) ou l'évitement automatique d'obstacles, peuvent nécessiter des éléments consommant une certaine puissance de calcul.

Les composants essentiels que l'on retrouve dans les systèmes embarqués de drone sont les suivants :

Une carte de navigation :

Cet élément permet de collecter toutes les données de navigation du drone. Elle mesure l'altitude ainsi que les accélérations et l'orientation sur les trois axes. Elle est donc composée d'un altimètre et de gyroscopes. Ces données sont envoyées à la station au sol mais servent également à la stabilisation du drone (résistance au vent) et à son pilotage automatique.

Sur un grand nombre de configurations (nombre limité de périphériques), cette carte assumera directement les fonctionnalités d'autopilotage et commandera les moteurs. Elle sera alors la carte principale du système embarqué et sera orchestrée par un logiciel d'exploitation dédié. On l'appellera alors un « contrôleur de vol ». Dans d'autres configurations, la carte de navigation (ou le contrôleur de vol), sera un périphérique d'une carte mère orchestrée par un système d'exploitation.

La carte fournit les données de navigations (télémétrie) sous le protocole MAVLink.

Un GPS :

Les drones à usage professionnel proposent des fonctions de « retour à la maison » et de « programmation de vol ». La première permet au drone de retourner tout seul à la station au sol en cas de perte de communication avec elle. La seconde permet à un opérateur de programmer des plans de vol pour le drone. Pour assurer ces deux fonctions, le drone doit connaître en permanence sa position. Au-delà de ces exemples particuliers, les logiciels d'autopilotage utilisent les données du GPS pour faire une correction continue de la trajectoire. La position du drone fait partie des données de navigation renvoyées à la station au sol. Le GPS peut être intégré au contrôleur de vol ou être une carte indépendante raccordée à la carte mère.

Une caméra :

La presque majorité des drones civils sont équipés d'une ou de plusieurs caméras. Les caméras ne sont jamais un simple ensemble optique. Le signal généré par les capteurs CCD (*Charge Coupled Device*) doit être traité, encodé et compressé (avec ou sans perte), avant d'être délivré en signal de sortie. La caméra est très souvent un système autonome complètement indépendant du système embarqué du drone.

Trois configurations différentes sont présentées ci-après:

- La première correspond à la configuration que l'on retrouve dans le modélisme de loisir où la caméra sert simplement d'aide à la navigation. Elle est fixe et renvoie des images dans le domaine du visible ; la qualité de celles-ci n'est pas une priorité. Dans cette configuration la caméra est très légère et est directement reliée à un émetteur vidéo. Elle n'est pas du tout reliée au système embarqué.
- Dans la seconde configuration, la caméra peut aussi être un système complètement isolé de celui du drone. En revanche, celle-ci doit fournir des images de bonnes qualités, stables et pilotables. A l'instar du drone, la caméra va donc intégrer les trois éléments suivants : un dispositif de stabilisation motorisé, un module de réception des données de contrôle (pilotage) et un module de transmission des images vidéo.
- Les applications audiovisuelles des drones nécessitent souvent une fonctionnalité de suivi de cible (« tracking »). Le drone, en plus de suivre son plan de vol, va devoir s'orienter pour que la cible choisie soit toujours au centre de l'image. Cela induit nécessairement une influence du contenu de l'image sur la motorisation du drone ou de la caméra. Dans ce cas, le flux vidéo sera traité et analysé par un composant centralisé qui sera responsable de diriger les moteurs en fonction des commandes reçues et de l'image. Cette configuration nécessite donc obligatoirement une carte mère avec un système d'exploitation exécutant des programmes tel que OpenCV.

Des modules de transmission et de réception:

Comme déjà évoqué, le drone peut échanger une grande quantité de données avec la station au sol. On peut isoler jusqu'à 4 canaux de communication qui peuvent chacun, dans les cas les plus complexes, nécessiter un module de transmission séparé. En fonction de l'architecture du système embarqué, on va trouver une combinaison de ces différents éléments :

- Une antenne de télémétrie pour envoyer les données de navigation à la station au sol.
- Un ou deux récepteurs de radio commandes, pour commander les moteurs du drone et ceux de la caméra.
- Un émetteur vidéo pour envoyer les images de la caméra.
- Une antenne Wi-Fi capable de transmettre tous types de données à la station de base.
- Une carte SIM 4G pouvant également émettre tous types de données.

Les trois premiers éléments peuvent être directement raccordés à un contrôleur de vol ou au système de la caméra (optique et motorisation). Les antennes Wi-Fi ou les cartes SIM ont vocation à être utilisées sur des architectures centralisées qui vont utiliser un seul canal de transmission pour échanger tous les types de données avec la station au sol.

Des capteurs de mesure

Les capteurs mesurent des données de l'environnement extérieur et les transforment en signaux électroniques analogiques. Ils peuvent intégrer des contrôleurs responsables de l'échantillonnage de ces signaux électroniques analogiques en signaux numériques encodés. Ces contrôleurs, intégrés ou non, peuvent être directement reliés à un système de transmission ou bien être reliés à une carte centralisée. On peut considérer une caméra infra-rouge comme un capteur des ondes électromagnétiques qui sont réfléchies par l'environnement. On trouve également des capteurs d'humidité, de gaz carbonique ou de pression atmosphérique. Comme la fonctionnalité de « tracking » précédemment évoquée, il existe des systèmes automatiques d'évitement d'obstacles, qui se basent sur des capteurs optiques et qui nécessitent un composant centralisé, pour diriger les moteurs en fonction de l'analyse du signal.

Les moteurs

Les moteurs sont interfacés avec des contrôleurs appelés ESC (Electronic Speed Control) qui permettent une régulation électronique de la vitesse de rotation. Cette interface électronique permet d'assurer des variations contrôlées de la puissance des moteurs.

Les batteries

Les drones fonctionnent grâce à des accumulateurs Lithium Polymère dites batteries LiPo. Ce sont des éléments qui se branchent et qui peuvent être remplacés en cours de missions. Les batteries fournies par les constructeurs de drone permettent des vols d'une vingtaine de minutes. Certaines batteries dites « intelligentes », fournissent au système des informations de charge et de température qui sont relayées à la station au sol.

Les architectures des systèmes embarqués

Comme nous avons pu le déduire, on peut isoler deux familles d'architecture dans la conception d'un drone.

Les architectures « électroniques »

Le système embarqué va être composé d'un assemblage d'éléments électroniques indépendants les uns des autres. Le cœur du système va être le contrôleur de vol¹⁸ qui va faire le lien entre les moteurs et les canaux de transmission. Il va recevoir les commandes depuis un canal dédié au contrôle du drone et diffuser les données de navigation sur celui dédié à la télémétrie. Tous les autres capteurs, y compris la caméra, seront isolés du système du drone et devront communiquer avec la station au sol par leur propre moyen. L'architecture matériel du contrôleur de vol est conçue pour une utilisation spécifique et sa logique est souvent régie par un microprogramme, ou « *firmware* », installé en usine. Celui-ci est dédié au composant et on peut difficilement le mettre à jour.

¹⁸ Description du contrôleur de vol Pixhawk: <http://www.ardupilot.org/copter/docs/common-pixhawk-overview.html>

Il existe toutefois des contrôleurs de vol qui peuvent piloter un support mobile de caméra et sur lesquels est installé un programme d'autopilotage open source nommé ArduPilot ou APM (Ardu Pilot Mega) que l'on peut faire évoluer. Bien que plus souples, ces systèmes n'offrent pas les fonctionnalités permises par une carte mère qui exécuterait un système d'exploitation généraliste. Il n'est pas possible d'exécuter n'importe quel processus.

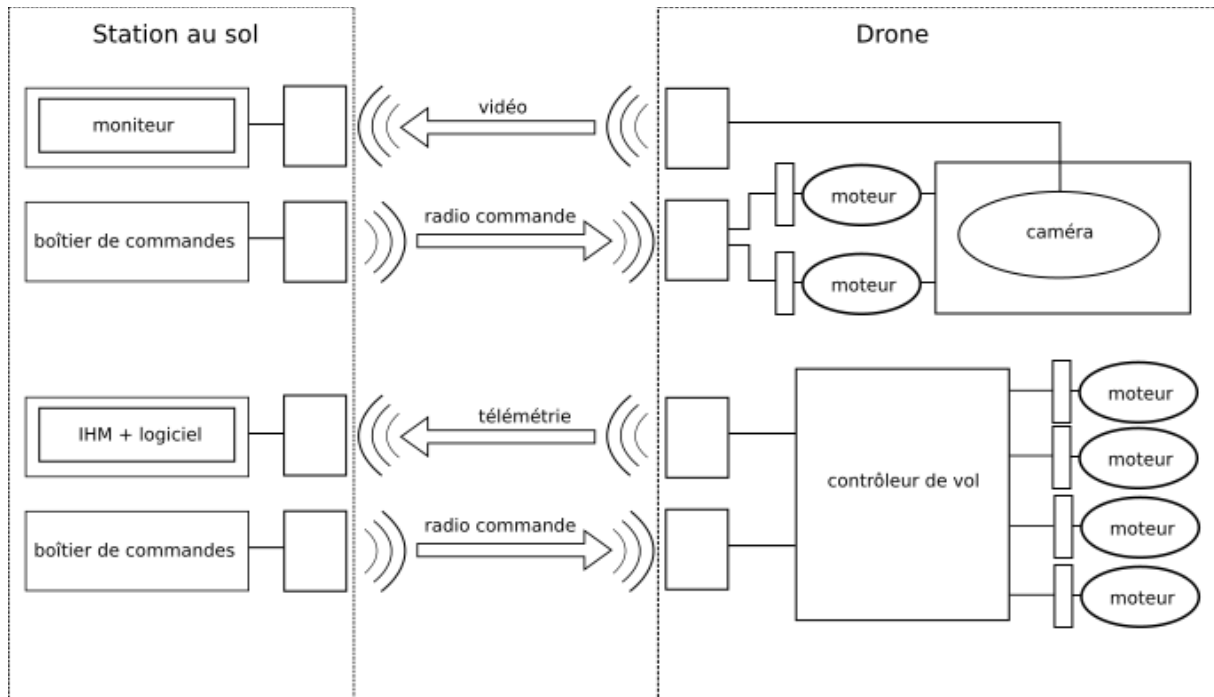


Illustration 16 : exemple d'architecture "électronique"

Les architectures « informatiques »

Dans cette architecture, le drone peut être considéré comme un ordinateur volant. Il s'agit d'un système centralisé dont le cœur est une carte mère orchestrée par un système d'exploitation. Tous les périphériques sont reliés à la carte mère. Elle s'occupe de les piloter ou de récolter leurs données en exécutant des logiciels installés sur le système. Il s'agit d'un ensemble évolutif. Aussi bien le système d'exploitation que les logiciels embarqués peuvent être changés ou mis à jour sans changer le matériel¹⁹.

Cette architecture permet de programmer des comportements influencés par des périphériques différents. Cela est le cas des fonctionnalités de « tracking » ou d'évitement d'obstacles, qui commandent les moteurs du drone en fonction des données récoltées par la carte de navigation (« centrale inertielle ») et des données transmises par les périphériques. Sur le marché on trouve des systèmes comme Navio2²⁰, qui est une carte de navigation directement assemblée sur une carte mère Raspberry Pi. Il existe aussi des cartes de navigation comme

19 Article sur les drones exécutant Linux: <http://www.networkworld.com/article/2912381/wireless/linux-in-the-air-drone-systems-go-open-source.html#slide1>

20 Navio2 : <http://ardupilot.org/copter/docs/common-navio2-overview.html>

PXFmini²¹ qui sont destinées à être raccordées à une carte mère. D'autres systèmes comme les cartes Beagle Bone Blue²² et Snapdragon Flight²³, sont des cartes exécutant un système d'exploitation Linux et qui intègrent directement tous les composants d'une carte de navigation classique.

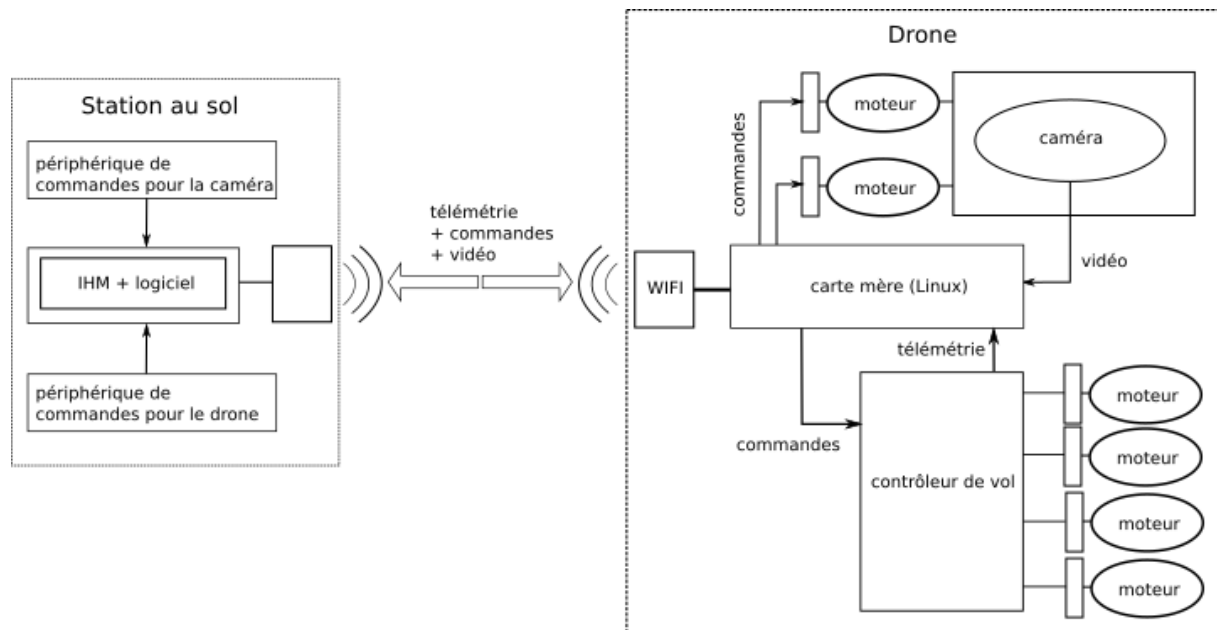


Illustration 17 : exemple d'architecture "informatique"

5.2.3 La charge utile

On appelle la charge utile du drone, tous les éléments qui ne lui servent pas à voler. Ce sont les composants que l'on va pouvoir changer d'une utilisation à l'autre. Cela peut être une caméra et son support, une nacelle ou encore un pulvérisateur. On distingue la charge utile de reste du drone car elle ne rentre pas en compte, dans le calcul du poids du drone. Une charge utile pourra être installée sur un drone en fonction de sa puissance et de sa capacité de levage.

5.2.4 Les modes de transmissions

Il existe plusieurs modes de transmission utilisés pour véhiculer les informations entre le drone et la station au sol. En fonction de l'utilisation que l'on fait du drone, de son architecture et du niveau de confidentialité des échanges, on va privilégier un mode de transmission ou un autre. A l'exception de la 4G, la grande majorité des émissions radio sont faites sur les fréquences de 2,4Ghz et 5,8Ghz.

21 PXFMini : <http://ardupilot.org/copter/docs/common-pxfmini.html>

22 Beagle Bone Blue : <http://ardupilot.org/copter/docs/common-beagle-bone-blue.html>

23 Snapdragon Flight : <http://ardupilot.org/copter/docs/common-qualcomm-snapdragon-flight-kit.html>

Émission radio directe

Il est possible d'établir une communication entre un drone et une station au sol en utilisant de simples émetteurs et récepteurs radio. Cela veut dire que les informations ne passent pas par les couches 2 à 6 du modèle OSI. Les messages de commande ou de télémétrie sont modulés et directement véhiculés sous forme d'ondes électromagnétiques (couche physique : niveau 1 du modèle OSI). Les messages ne sont pas adressés à un destinataire en particulier (couche liaison : niveau 2) ; ils sont émis et n'importe quelle antenne écoutant sur la même fréquence peut les recevoir. Cependant, la modulation DSMx (algorithme de modulation propriétaire), qui est largement répandue dans les drones de loisir, utilise la technologie CDMA (Code Division Multiple Access) pour limiter les risques de conflits.

Utiliser une émission directe induit que les données de télémétrie et de commande soient émises sur des canaux séparés et qu'il n'y ait pas d'autres données à transmettre. En fonction de la qualité des antennes, on peut émettre de quelques mètres à plusieurs kilomètres. Le drone professionnel Inspire 2²⁴ est un exemple de ce mode de transmission. C'est une technologie privilégiée pour les drones de cinéma car la caméra a son propre module de pilotage radio-commandée (la vidéo est transmise sur un autre canal).

Émission radio Wi-Fi

Dans cette configuration, la station au sol et le drone communiquent via un protocole implémentant les deux premiers niveaux du modèle OSI. C'est-à-dire la transmission du signal encodé et modulé (couche physique : niveau 1) et la définition d'un destinataire ayant une adresse MAC (Medium Access Control) (couche liaison : niveau 2). Ce protocole est également porté par un signal radio. Il peut donc être intercepté par n'importe quel récepteur et il est aussi soumis aux interférences avec d'autres émissions sur la même fréquence. Malgré tout, il identifie les participants et permet de mettre en place un réseau ad hoc (il n'y a pas de passerelle réseau, les nœuds communiquent entre eux directement).

Ce protocole de niveau 2 peut permettre de définir une clé pour sécuriser les échanges. Cependant, si elle est utilisée, les algorithmes de chiffrements ralentissent la transmission. Il permet également d'encapsuler des messages de couches supérieures. La couche transport qui peut être implémentée par TCP (Transmission Control Protocol) ou UDP (User Datagram Protocol) permet un multiplexage applicatif par port. C'est grâce à cela que l'on peut véhiculer tous les types de message sur le même canal.

Aujourd'hui, certains drones semi-professionnels²⁵ ou de loisirs²⁶, utilisent ce protocole. Les constructeurs présentent des portées de 2km grâce à un multiplexage MIMO (Multiple Input Multiple Output). Toutefois si l'on respecte les puissances maximales autorisées en France, on peut difficilement dépasser les 500 mètres de portée avec ce type d'appareils.

24 Inspire 2 : <http://www.dji.com/inspire-2>

25 Phantom 4 : <http://www.dji.com/phantom-4>

26 Parrot Bebop 2: <https://www.parrot.com/fr/Drones/Parrot-Bebop-2>

Le Wi-Fi bi band permet également de diffuser sur une fréquence de 5Ghz. Elle résiste mieux aux interférences mais elle traverse moins bien les obstacles.

Émission radio 4G

Le principe de l'émission des données en 4G est d'équiper les drones d'une carte SIM (Subscriber Identity Module) et de communiquer avec eux par l'intermédiaire du réseau de téléphonie. Ce mode de transmission a l'avantage de pouvoir bénéficier de l'étendue du réseau téléphonique pour augmenter la portée du drone. C'est grâce aux performances offertes par la 4G LTE Advanced (Long Term Evolution), qui augmente considérablement le débit de données transmises, que son application au drone est envisageable.

Il s'agit encore d'une configuration qui finalise ses phases d'essais. On trouve plusieurs vols réalisés par des industriels de drones pilotés par le réseau téléphonique à titre expérimental²⁷. Les résultats semblent très concluants et laissent penser que cette fonctionnalité sera bientôt disponible sur l'ensemble des drones.

Si le pilotage de drones à travers le réseau 4G est encore à ses balbutiements, un grand nombre de constructeurs propose déjà des connexions au réseau LTE pour transmettre des données de mesures ou de navigations. Par exemple, un des plus gros industriels français de drones professionnels, « Delta Drone », remplit des exigences de traçabilité des vols en proposant pour ses engins, une fonctionnalité de publication en temps réel des données de navigation sur le cloud (Cloud Information System)²⁸. La société Japonaise « Terra Drone » a quant à elle, terminé le développement d'un système de drone entièrement basé sur la 4G²⁹. Celui-ci permet de piloter et de gérer un trafic de plusieurs drones.

Positionnement par satellite

Il existe des aéronefs qui améliorent leur positionnement grâce à une communication satellitaire via une station de base. Ce système nommé GNSS (*Global Navigation Satellite System*) leur permet d'améliorer la précision de leur plan de vol et de leur relevé photogrammétrique. Le drone « eBee RTK³⁰ » utilise cette technologie.

27 Expérimentations 4G: <https://www.les-drones.com/actualite-du-drone/piloter-un-drone-avec-un-simple-forfait-mobile-et-la-4g/>

<https://www.qualcomm.com/media/documents/files/lte-unmanned-aircraft-systems-trial-report.pdf>

28 Delta Drone CIS: <http://www.deltadrone.com/fr/systemes/deltadrone-cloud-information-system/>

29 Terra Drone : <http://www.terra-drone.net/en/kddi-and-terra-drone-have-announced-completion-of-inventing-4g-lte-control-system/>

30 Drone « eBee RTK »: <https://www.sensefly.com/drones/ebec-rtk.html>

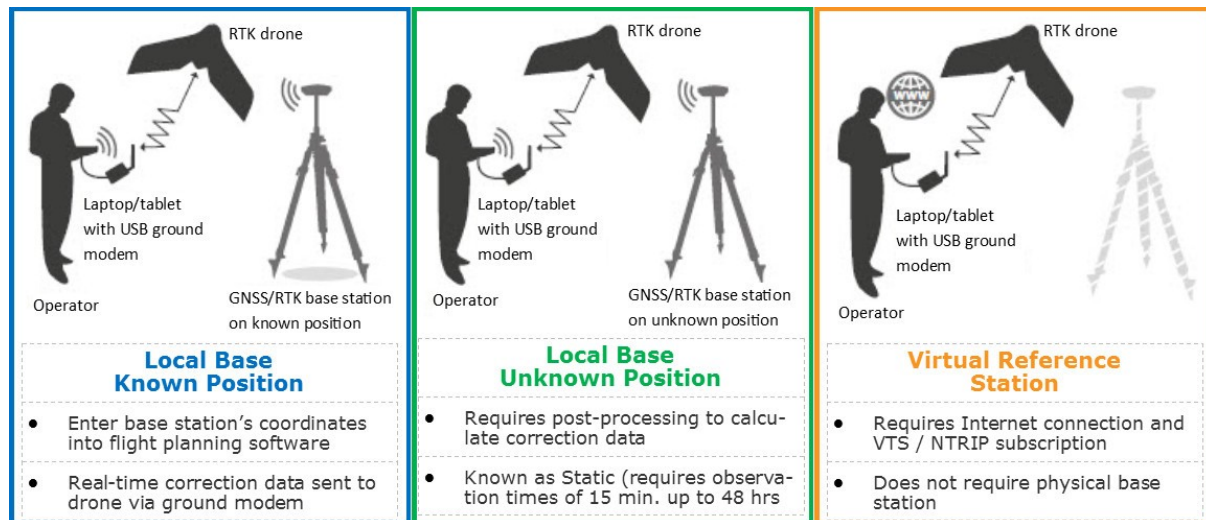


Illustration 18 : les 3 modes de positionnement du drone eBee RTK

5.2. Les failles de sécurités

On trouve deux exemples de piratages de drones dans la littérature. Dans les deux cas, il s'agit de piratages ayant eu lieu sur des technologies grand public. Il n'est pas toujours évident de faire une distinction entre les fonctionnalités offertes par les drones professionnels et celles offertes par les drones de loisir. La différence majeure vient du fait que les drones grand public sont basés sur des technologies libres ou bien facilement accessibles, alors qu'il est très difficile de trouver des détails précis sur les technologies employées dans les drones professionnels. C'est la raison pour laquelle l'analyse technique du présent mémoire s'est principalement basée sur les technologies ouvertes.

Les drones professionnels semblent pour le moment épargnés par le piratage car leur technologie est propriétaire, leur documentation technique est confidentielle et ils représentent une toute petite partie des drones en circulation. Leur coût, rarement inférieur à 5000 euros, est également prohibitif pour un pirate qui voudrait faire de l'ingénierie inverse afin de trouver une faille qui ne pourrait être exploitée que contre un seul constructeur.

Malgré tout, avec l'augmentation de la part de marché des drones professionnels et avec la possible généralisation des technologies grand public, la situation pourrait changer.

5.2.5 Les failles révélées

*Icarus*³¹

31 Icarus: <http://www.futura-sciences.com/tech/actualites/drone-icarus-boitier-peut-pirater-nimporte-drone-plein-vol-65063/>

Icarus est un petit boîtier branché à une commande extérieure au système de drone. Il permet de prendre le contrôle de l'aéronef si celui-ci est piloté en radio fréquence avec le protocole DSMx. La presque totalité des drones de loisir pilotés en radio fréquence sont concernés par cette faille de sécurité. Il est donc important, lorsqu'on se procure un drone professionnel radio-commandé (principalement les drones de prises de vue), de s'assurer auprès du constructeur que le protocole utilisé est propriétaire et qu'il est un minimum sécurisé.

Attaque sur l'AR Drone de Parrot

L'AR Drone de Parrot a été le premier drone grand public pilotable grâce à un smartphone. Il a connu un très large succès et a été largement diffusé. Son système embarqué exécute un système d'exploitation Linux sur une carte mère raccordée à une carte de navigation. Il est à ce titre le premier ordinateur volant grand public.

Un ingénieur en sécurité a montré comment repérer le réseau Wi-Fi exposé par le drone pour s'y connecter à la place du véritable pilote afin d'en prendre le contrôle³². Cette attaque est possible car le réseau Wi-Fi n'a pas de clé par défaut et parce que les connexions directes au drone, grâce au protocole « telnet », sont possibles³³.

Il n'est pas étonnant qu'un drone de loisir grand public ne soit pas protégé. La configuration entre le drone et le téléphone doit être la plus simple possible et l'utilisation d'une clé de chiffrement ralentirait drastiquement les performances de la communication avec le drone. Compte-tenu de l'absence de risque réel, la mise en place d'une telle sécurité serait un handicap commercial.

Cependant, cette attaque est intéressante car il s'agit d'une attaque informatique classique. Elle nous rappelle que les drones qui fonctionnent avec des systèmes d'exploitation connus sont des ordinateurs comme les autres et qu'ils sont exposés sur des réseaux visibles.

5.2.6 Les failles potentielles

Lors de l'utilisation d'un drone professionnel, il est important de mettre en place une politique de sécurité standard. Il convient de sécuriser le système de drone complet. C'est-à-dire le drone, la station au sol et le pilote. Une telle politique consiste à faire une analyse des failles du système et à estimer si ces dernières représentent un risque. Ces risques doivent être évalués et pondérés. Le résultat de cette analyse ne sera pas le même en fonction des usages.

Par exemple, il peut être particulièrement important de sécuriser le transfert des vidéos pour un drone d'inspection de site industriel. On peut aussi imaginer une situation où toutes les données seraient transférées sur un canal Wi-Fi non protégé pour ne pas ralentir le contrôle du drone. Les données de mesures seraient alors encapsulées dans des messages applicatifs qui

32 Attaque de l'AR Drone de Parrot: <http://www.drone-trend.fr/comment-pirater-un-drone-709>

33 Dossier technique de l'AR Drone de Parrot: <http://si.lycee-desfontaines.eu/sequences-1s/capte/res/Dossier-technique-AR-Drone.pdf>

seraient chiffrés à l'aide d'une clé partagée par le drone et la station. Dans des applications très confidentielles, il est possible que l'essentiel de l'effort de sécurité doive être concentré sur le recrutement du pilote. Il ne sert à rien de construire une chaîne de sécurité inviolable si la personne dont vous souhaitez vous protéger est en fait l'opérateur principal.

Pour le moment, il y a beaucoup de constructeurs différents et les architectures sont très hétérogènes. Il est donc peu probable qu'un individu malveillant déploie un effort conséquent pour un type de système unique. Comme déjà évoqué, les coûts des drones professionnels font que l'ingénierie inverse est encore difficile à mettre en œuvre. Cependant, si l'on tient compte des conclusions amenées par les études de marché, la situation risque de changer. Les constructeurs de drones professionnels vont, semble-t-il, migrer leur métier du « matériel » au « logiciel » à cause de la concurrence imposée par les drones de loisirs qui sont de plus en plus performants.

Lorsque les différents types de technologies employées seront réduites à un nombre limité et que leur coût sera accessible à n'importe qui, les systèmes de drones professionnels seront alors une cible privilégiée et ils subiront les mêmes attaques que celles subies par les drones de loisirs à l'heure actuelle. La généralisation de la 4G comme mode de communication permettra sans doute de bénéficier d'un canal physique plus sûr que le Wi-Fi. Toutefois, est-on vraiment sûr que le réseau d'un système de drone sera complètement isolé du réseau internet ?

Les systèmes de drones ont vocation à devenir des systèmes informatiques complets. A ce titre, ils sont trop hétérogènes pour isoler des failles en particulier. Malgré tout, afin de pouvoir intégrer la chaîne informatique au sein d'une politique de sécurité, on peut affirmer les points suivants :

- Il faut maîtriser son système. C'est-à-dire connaître les technologies employées et en repérer les failles.
- Sélectionner et former le personnel.

5.3. Les types de drones et leur usage

Lors du choix d'un drone, il est important d'identifier le scénario opérationnel qui correspond à son usage. Les drones homologués par la DGAC sont homologués pour un scénario opérationnel en particulier. On s'aperçoit que les drones les plus performants sont très majoritairement utilisables dans le cadre des scénarios S1, S2 et S3 et qu'ils sont presque tous des drones à voilures tournantes (communément appelé multicopters). Dans la catégorie des drones homologués pour les scénarios S2 et S4, il n'existe que des drones à voilures fixes (apparentées à des ailes). On peut donc isoler deux grandes familles de drones.

5.3.1. Les drones à voilures fixes pour les scénarios S2 et S4

Caractéristiques

Ces derniers ont une portance naturelle qui leur permet de parcourir de grandes distances en planant et en consommant peu d'énergie. Ils peuvent faire des vols pouvant durer jusqu'à deux heures. Du fait de leur éloignement, ils ne transmettent pas de signal vidéo et ils ne sont jamais pilotés manuellement en temps réel. Ce sont des drones qui suivent une trajectoire définie par un programme de vol. Leur utilisation est donc réservée à des zones dégagées. Ils sont très légers et leur charge utile est limitée au strict minimum. Ce sont les drones les plus chers. Le plus répandu à l'heure actuelle est le drone « eBee » car il ne nécessite pas de pilote licencié. Il est donc utilisable dans le cadre d'un scénario S2 où la distance entre lui et le pilote est limitée à 1km.



Illustration 19 : le drone eBee pour un scénario de type S2

Pour un cadre opérationnel de type S4, dont la distance n'est limitée que par la technologie, il faut rajouter le coût d'un pilote licencié à celui du drone. Comme la portée n'a pas vocation à être limitée à 1km, la station au sol est reliée à un modem radio de forte puissance.

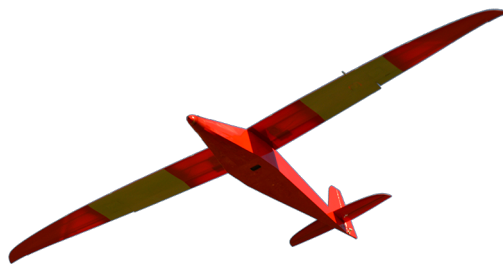


Illustration 20 : le drone AVEM de AEROMAPPER couvre le scénario S4

Cadre d'utilisation

Ce sont des drones qui nécessitent la couverture rapide d'un territoire étendu. Ils sont principalement utilisés dans les BTP, les transports et l'agriculture pour faire de la photogrammétrie ou de l'inspection longue distance sans obstacle.

5.3.2. Les drones à voilures tournantes pour les scénarios S1, S2 et S3

Les drones appelés multicopters sont des aéronefs dont la portance est uniquement assurée par la rotation d'au moins 3 hélices (il existe des hélicoptères sans pilote mais leur utilisation est marginale).

Ce système nécessite une grande quantité d'énergie mais permet de définir des trajectoires non linéaires dans des environnements avec obstacles. Ils peuvent être pilotés à vue en commande manuelle directe pour des scénarios de type S1 et S3. Il est également possible de les piloter hors vue grâce à la programmation de vol pour des scénarios de type S2. Pour ce scénario, ils offrent un temps de vol plus court que les ailes fixes mais ils ont l'avantage d'être beaucoup moins cher.

Leur utilisation dans le cadre des scénarios de type S1 et S3 est souvent associée à une émission vidéo qui facilite la navigation du drone mais limite leur portée. Ces drones représentent la grande majorité et il est très difficile de les catégoriser tant leurs fonctionnalités sont diverses. On choisira de les isoler en deux sous-familles, déterminées par leur capacité à lever une charge.

Les multicopters porteurs

Ce sont des engins capables de porter des charges importantes. Ils ont en général un minimum de six moteurs. La multiplication des moteurs permet de lever des poids élevés. Leur distribution dans l'espace permet également une meilleure stabilité et une meilleure navigabilité du drone. Ils sont naturellement plus chers que les multicopters à trois ou quatre moteurs.

Ces aéronefs sont utilisés essentiellement pour le cinéma car ils permettent d'embarquer du matériel de prise de vue professionnel, avec un système de commande indépendant de celui du drone. Dans les autres cas, on les utilise pour tous les travaux en altitude qui nécessitent de porter du matériel. Par exemple, la pulvérisation de produit de traitement sur un toit ou l'injection d'insecticide dans un nid de frelons. Ces types de travaux se font rarement sans un retour vidéo et nécessite la plupart du temps une commande directe.



Illustration 21 : drone DIJ-s900 et drone Spray de AGRAM

Certains de ces drones sont trop lourds pour être utilisés en agglomération et ne peuvent pas couvrir le scénario S3.

Les multirotors simples

Les multirotors simples sont moins lourds et moins chers que ceux destinés au levage de charge. Ils embarquent généralement une petite caméra ou caméra thermique. Ils permettent de couvrir le scénario S2, souvent associé à l'inspection agricole ou industrielle et à moindre coût que l'utilisation d'un drone à voilure fixe. Ils sont aussi utilisés pour toutes les missions d'inspection dans des environnements non dégagés. Leur poids limité les privilégie pour une utilisation en agglomération.



Illustration 22 : plateforme dji-matrice-100 personnalisable

5.3.3. Analyse comparative des différents type de drones :

Un type de drone n'est pas souvent dévolu à un domaine d'application en particulier. Le choix d'un drone va être fait en fonction du travail qu'il va effectuer mais aussi et surtout en fonction du cadre spécifique à la mission. Le diagramme ci-dessous tente de déterminer quel type d'aéronef devra être choisi en fonction des caractéristiques requises pour une mission en particulier et en fonction des utilisations qui en sont déjà faits. Par exemple, les drones porteurs peuvent être conduit par de la programmation de vol et couvrir le scénario S2, au même titre que les autres . Néanmoins cette configuration est marginale et ne représente que des cas très particuliers.

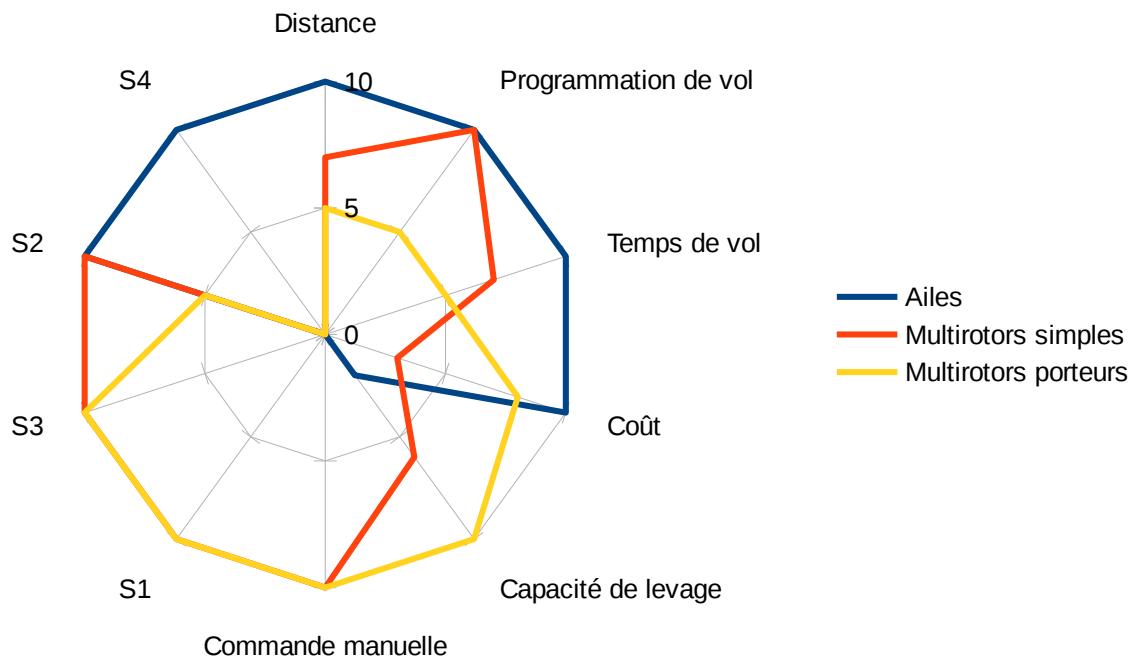


Illustration 23 : analyse comparée des types de drones

6. Les drones de demain

6.1. Les technologies en développement

6.1.1. La 5G et l'IOT

Comme cela a été mentionné lors de la description des différents systèmes de transmissions, plusieurs constructeurs sont actuellement en train de finaliser le développement et les tests de systèmes de drones entièrement basés sur le réseaux 4G. A terme, l'intérêt pour les constructeurs de migrer vers ce mode de transmission n'est pas seulement d'étendre la portée du drone. C'est aussi d'intégrer les drones dans un réseau beaucoup plus large, afin de constituer un système de drones qui soit étendu et non plus localisé.

Le drone a vocation à devenir un capteur mobile qui envoie ses données sur un cloud privé ou public, afin qu'elles soient disponibles en temps réel et sans limite géographique. Ces types d'objets sont appelés des « objets connectés » et tissent la trame d'un réseau appelé « l'internet des objets ». Le terme anglais est « Internet Of Things », ou plus communément « IOT ». Pour le moment, l'IOT est construit sur des réseaux indépendants du réseau téléphonique mais l'arrivée imminente de la 5G (prévue pour 2020) va l'intégrer dans son architecture en lui réservant des canaux et en lui assurant ainsi un haut niveau de qualité de service.

A en croire un article publié par « www.droneanalyst.com »³⁴, l'architecture d'un tel système serait basée sur ce que l'on appelle le « fog computing » ou « *informatique géodistribuée* ». Le principe serait que les drones ne publieraient pas directement leurs données sur le cloud car cela poserait des problèmes de sécurité et de congestion. Les drones communiqueraient via le réseau téléphonique avec des stations de calcul dédiées et situées à proximité. Ces stations seraient en charge de l'analyse, du traitement et de la publication des données sur le cloud. Elles isoleraient les drones du réseau internet et éviteraient la congestion de celui ci.

Le réseau téléphonique permettrait d'accéder aux données publiées par le drone sans limite géographique mais également de pouvoir lui envoyer des programmes de vol depuis n'importe quel poste. On trouve déjà des mentions du concept de « UAV as a Service (UAVaaS) » par analogie aux différents types de services fournis par le cloud. Un tel service proposerait de piloter une flotte de drones située à l'autre bout du monde depuis son poste de travail et d'en récolter les données directement sur le cloud.

34 Why drones are the future of IOT : <http://droneanalyst.com/2014/12/01/drones-are-the-future-of-iot/>

6.1.2. Intelligence artificielle et essais de drones

Deux conférences « TED » données par le professeur des systèmes dynamiques Raffaello D'Andrea³⁵, font la présentation de deux principes novateurs appliqués aux drones, qui laissent apparaître leur potentiel futur dans d'autres domaines d'application. Le principe qui repose sur ces deux avancées est la substitution de l'opérateur de commande humain par une couche logicielle. Grâce à un opérateur non-humain, il est possible d'introduire de l'intelligence artificielle dans les algorithmes de commandes d'un drone afin qu'il améliore par l'apprentissage ses performances, au vu de la mission qu'il a à accomplir. Un exemple d'application serait la possibilité pour un drone d'adapter son algorithme de commande en fonction des conditions météorologiques ou de son environnement. L'autre avantage apporté par cette substitution est la possibilité de commander une flotte de drones dans l'optique de leur faire effectuer un travail commun. Chaque aéronef est ainsi comme le membre d'une intelligence située à un niveau supérieur. Cette architecture fait envisager des outils de maintenance ou de construction d'un tout nouveau genre, comme pourrait l'être une pieuvre qui n'aurait aucune limite de taille. L'humain se contenterait de modéliser la construction souhaitée et les drones la réaliseraient.



Illustration 24 : drones autonomes et apprenants, présentés par Raffaello d'Andrea

6.2. Les enjeux sociétaux

Les drones sont des objets pouvant se déplacer dans tous les environnements et être en mesure de récolter tous types d'informations rapidement et discrètement. Compte-tenu des progrès conjugués dans les domaines de la communication et de l'intelligence artificielle, ils pourraient être à très court terme les instruments d'une intelligence performante et évolutive, capable d'interagir en tout lieu sans limite de distance. Une telle description a évidemment l'intention de souligner le potentiel liberticide de cette technologie et d'en évoquer les perspectives les plus inquiétantes. Heureusement, nous ne sommes pas en « 1984³⁶ » et l'esprit humain a tendance à exagérer les choses aussi vite qu'il les abandonne.

35 Dossier ARTE : <http://future.arte.tv/fr/les-drones-une-technologie-controversee/ted-talk-des-drones-qui-pensent-comme-des-athletes?language=de>

36 Référence au roman dystopique de George Orwell.

Les questions éthiques sont évidemment présentes et heureusement nous avons un cadre législatif et des institutions comme la CNIL pour empêcher les pratiques abusives. Les drones suscitent énormément d'engouement car ils permettent au plus grand nombre de s'approcher du rêve d'envol et d'omniscience qui est inscrit en chacun de nous. Tout rêve qu'il soit, il ne résistera pas au pouvoir encore plus fort de pragmatisme et de banalisation qui caractérise l'humain. Comme le reste, les drones seront jugés à l'aune de leur rentabilité et ne prendront que la place qui leur est due dans le paysage technologique et économique mondial.

Malgré les facilités législatives mises en place par la France, les drones se sont développés sans que leur part de marché explose. Les innovations technologiques à venir vont sans doute l'élargir un peu car de nouvelles applications vont voir le jour. Cependant, à l'heure actuelle, je n'en vois aucune qui permettrait aux drones de s'inscrire dans le mouvement inéluctable et généralisé de la transition énergétique et qui en ferait un acteur majeur des années à venir. Les drones ont vocation à devenir des outils performants et spécialisés qui seront indispensables dans des applications de niches. Ils ne représentent pas à mon avis des enjeux sociétaux d'envergure, du moins, tant que nos institutions seront là pour réglementer leur utilisation...

BIBLIOGRAPHIE

★37

Définition Larousse :	http://www.larousse.fr
Définition Wiktionary :	https://fr.wiktionary.org
Définition Wikipédia :	https://fr.wikipedia.org
Législation Française pour les drones :	http://www.federation-drone.org/les-drones-dans-le-secteur-civil/la-reglementation-francaise/
Guide activités particulières :	http://www.developpement-durable.gouv.fr/sites/default/files/Guide_Activites_particulieres_v1.2_10jan17.pdf
AETOS Cluster Drone sur la réglementation:	http://www.aetos-aquitaine.fr/p1-2-10-reglementation.html
Tableau national des fréquences :	http://www.anfr.fr/gestion-des-frequences-sites/le-tnrbf/
Infographie Drone Volt sur le marché des drones :	http://www.dronevolt.com/fr/les-chiffres-cles-du-drone-linfographie/
Article sur l'étude de Oliver Wyman :	http://www.usinenouvelle.com/article/infographie-le-marche-francais-des-drones-civils-pourrait-depasser-650-millions-d-euros-en-2025.N381962
Projet MIRIAD :	http://www.meteofrance.fr/actualites/30601463-innovation-des-drones-pour-mieux-connaître-l-atmosphere
Projet BACCHUS :	http://www.meteofrance.fr/actualites/22577295-video-des-mini-drones-instrumentes-pour-la-recherche-en-meteorologie
Fabriquer un drone pas cher :	https://www.mondrone.net/monter-un-quad-racer-pas-cher/
Site de conception de drones de loisirs:	http://ardupilot.org/copter/docs/introduction.html
Système Radio Commandé basique :	http://wollef.org/fr/voitures-rc-le-fonctionnement-de-la-telecommande-et-du-recepteur/
Article sur les drones exécutant Linux:	http://www.networkworld.com/article/2912381/wireless/linux-in-the-air-drone-systems-go-open-source.html#slide1
Inspire 2 :	http://www.dji.com/inspire-2
Phantom 4 :	http://www.dji.com/phantom-4
Parrot Bebop 2:	https://www.parrot.com/fr/Drones/Parrot-Bebop-2
Contrôleur de vol Navio2 :	http://ardupilot.org/copter/docs/common-navio2-overview.html
Contrôleur de vol PXFMini :	http://ardupilot.org/copter/docs/common-pxfmini.html
Système Beagle Bone Blue :	http://ardupilot.org/copter/docs/common-beagle-bone-blue.html
Système Snapdragon Flight :	http://ardupilot.org/copter/docs/common-qualcomm-snapdragon-flight-kit.html
Expérimentations 4G:	https://www.les-drones.com/actualite-du-drone/piloter-un-drone-avec-un-simple-forfait-mobile-et-la-4g/ https://www.qualcomm.com/media/documents/files/lte-unmanned-aircraft-systems-trial-report.pdf

37 Tous les liens indiqués étaient valides durant le mois de mai 2017

Icarus	http://www.futura-sciences.com/tech/actualites/drone-icarus-boitier-peut-pirater-nimporte-drone-plein-vol-65063/
Attaque de l'AR Drone	http://www.drone-trend.fr/comment-pirater-un-drone-709 http://si.lycee-desfontaines.eu/sequences-1s/capte/res/Dossier-technique-AR-Drone.pdf
Delta Drone CIS:	http://www.deltadrone.com/fr/systemes/deltadrone-cloud-information-system/
Terra Drone :	http://www.terra-drone.net/en/kddi-and-terra-drone-have-announced-completion-of-inventing-4g-lte-control-system/
Drone « eBee RTK »:	https://www.sensefly.com/drones/ebec-rtk.html
Why drones are the future of IOT :	http://droneanalyst.com/2014/12/01/drones-are-the-future-of-iot/
Dossier ARTE :	http://future.arte.tv/fr/les-drones-une-technologie-controversee/ted-talk-des-drones-qui-pensent-comme-des-athletes?language=de

LISTE DES ILLUSTRATIONS

Illustration 1 : résumé du cadre opérationnel de chaque scénario.....	13
Illustration 2 : évolution du marché des drones civiles en France.....	15
Illustration 3 : marché mondial actuel des drones civil (Gartner).....	16
Illustration 4 : parts de marché des drones professionnels en France à l'horizon 2025.....	16
Illustration 5 : drone SNCF et exemples de recherche de défaut par thermographie.....	18
Illustration 6 : modélisation d'une carrière réalisée par photogrammétrie (société Geo2R)....	19
Illustration 7 : exemple d'un relevé de Vigueur Végétal publié par Drones Imaging.....	19
Illustration 8 : prise de vue en zone inaccessible (Photo de Fred Ripert).....	20
Illustration 9 : drone ambulance de Alec Momont et drones pompiers.....	20
Illustration 10 : site sous la surveillance de la société Drone Protect System.....	21
Illustration 11 : drone de mesure atmosphérique utilisé dans le cadre du projet MIRIAD.....	21
Illustration 12 : cirque du soleil, son et lumière Intel et spectacle "Shadow".....	22
Illustration 13 : drone entrepôt "Eyeseer" de la société Hardis.....	22
Illustration 14 : différents types de stations au sol.....	23
Illustration 15 : organes d'un module de contrôle élémentaire.....	25
Illustration 16 : exemple d'architecture "électronique".....	29
Illustration 17 : exemple d'architecture "informatique".....	30
Illustration 18 : les 3 modes de positionnement du drone eBee RTK.....	33
Illustration 19 : le drone eBee pour un scénario de type S2.....	36
Illustration 20 : le drone AVEM de AEROMAPPER couvre le scénario S4.....	36
Illustration 21 : drone DIJ-s900 et drone Spray de AGRAM.....	38
Illustration 22 : plateforme dji-matrice-100 personnalisable.....	38
Illustration 23 : analyse comparée des types de drones.....	39
Illustration 24 : drones autonomes et apprenants, présentés par Raffaello d'Andrea.....	41

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: glossaire pour le guide relatif aux activités particulières.....	10
---	----

RÉSUMÉ

La miniaturisation des composants électroniques et les progrès faits dans le stockage de l'énergie électrique ont permis l'apparition récente des drones dans le paysage technologique mondial. Rendus populaires grâce à une forte exposition dans le marché de l'aéromodélisme, le gouvernement Français a favorisé l'utilisation des drones à usage professionnel en définissant un cadre législatif détaillé. Cette réactivité a fait de la France un des pays pionner dans le développement des drones professionnels et lui donne une bonne position dans un marché international en pleine expansion. Grâce leur facilité d'emploi et à leur potentiel aéronautique, les drones représentent aujourd'hui un atout commercial dans des domaines d'application aussi variés que l'industrie, l'agriculture ou les arts du spectacle. Les attentes sont de plus en plus importantes et leur conception tend à les transformer en plateformes informatiques autonomes, intégrées dans des systèmes d'information complets. Alors que l'avènement imminent de la 5G promet de faire des drones des objets connectés, l'émergence de l'intelligence artificielle appliquée à des logiciels d'autopilotage centralisés, semblent ouvrir la voie à des applications d'un nouveau genre.

SUMMARY

The miniaturization of electronic components and the progress made in the storage of electrical energy have allowed the recent appearance of drones in the global technological landscape. Raised popular thanks to a strong exposure in the aircraft modeling market, the French government has encouraged the use of drones for professional use by defining a detailed legislative framework. This reactivity has made France one of the pioneering countries in the development of professional drones and gives it a good position in a rapidly expanding international market. Due to their ease of use and their aeronautical potential, drones today represent a commercial asset in fields as varied as industry, agriculture or the performing arts. Expectations are increasingly important and their design tends to transform into stand-alone computing platforms, integrated into comprehensive information systems. While the imminent advent of 5G promises to make drones of connected objects, the emergence of artificial intelligence applied to centralized self-steering software seems to open the way to new applications.