

Rodolphe Jobard

2^e édition

Nouvelle
réglementation
2016

LES DRONES

**FONCTIONNEMENT • TÉLÉPILOTAGE
• APPLICATIONS • RÉGLEMENTATION**



Copyright © 2016 Eyrolles.

EYROLLES

**SERIAL
MAKERS**

Tout savoir sur les drones civils

Longtemps réservés à des fins militaires, les drones séduisent aujourd'hui l'industrie par leurs nombreuses applications : photographie et vidéo aériennes, inspection d'ouvrages, surveillance, dépose d'objets, relevés topographiques, épandage... Grâce à une réglementation assouplie, ils intéressent également un public grandissant d'amateurs passionnés. Richement illustré et accessible à tous, cet ouvrage vous apprendra tout sur les drones civils : comment volent-ils ? pourquoi autant de formes différentes ? est-ce facile à télépiloter ? faut-il un brevet ? comment fabriquer son propre drone ? S'adressant aussi bien aux professionnels qu'aux particuliers, il vous poussera certainement à endosser les habits de télépilote !

À qui s'adresse ce livre ?

- Aux aéromodélistes, passionnés, makers, décideurs ou simples curieux de cette technologie et de son potentiel
- Aux particuliers comme aux entreprises

Au sommaire

Des drones militaires aux drones civils • Anatomie d'un drone • Des drones de toutes les formes • Principaux composants du véhicule • Charge utile • Équipements au sol • Moyens de lancement et de récupération • Dispositifs de sauvegarde et de sécurité • **Comment vole un drone ?** • Un peu de théorie • Domaine de vol • Comment se dirige un drone ? • **Comment télépiloter un drone ?** • Types de télépilotage et modes de vol • Risque du vol automatique • Analyse des paramètres de vol • **À quoi sert un drone ?** • Applications médias • Surveillance • Agriculture et environnement • Relevés topographiques • Inspection d'ouvrages ou de matériel • Transports d'objets • Contraintes et limites des drones • **Réglementation** • Démarches administratives • Scénarios de vol • Restriction des espaces de vol • Vols basse hauteur de l'armée • Protection de la vie privée et antidrones • **Comment débiter avec un drone en kit ?** • Quelques précautions avant le montage • Outils et savoir-faire requis • Quel drone choisir ? • Montage d'un drone : construction d'un petit quad • Premiers vols du drone.



Passionné d'aviation et d'aéromodélisme, **Rodolphe Jobard** est un pionnier du suivi

photogrammétrique de chantiers et d'inspection d'ouvrages par drone, techniques qu'il a mises en œuvre au cours de sa carrière dans une grande société industrielle. Délégué Île-de-France de la Fédération professionnelle du drone civil, il est aussi président de Dronea, qui met les drones au service de l'industrie.

www.dronea.fr

Rodolphe Jobard

Préface de Peter van Blyenburgh

LES DRONES

FONCTIONNEMENT • PILOTAGE
• APPLICATIONS • RÉGLEMENTATION

Deuxième édition

EYROLLES



- © AFP pour la figure 5-11
- © Airinov pour la figure 5-10
- © Delta Drone pour la figure 2-9
- © Éditions de Breteuil (1956) pour la figure 3-1
- © Henri Kenhmann (China Military Information Channel) pour la figure 5-9
- © Infotron pour la figure 2-7
- © Lehmann Aviation pour la figure 2-3
- © Opale Paramodels pour la figure 2-57
- © Survey Copter pour la figure 2-5
- © UAV-G Rostock pour les images 2-2, 2-14, 2-17, 2-18, 2-53 et 2-54

Les figures 1-1, 1-13 (U.S. Army), 1-3 (David Conover), 1-8 (Valdivarius), 1-9, 1-11 (Stacey Knott pour l'U.S. Air Force), 1-20 (IEMN) et 1-2 sont dans le domaine public.

Les figures 1-4 (Archives fédérales allemandes), 1-5 (AElfwine), 1-7 (Duch.seb), 1-12 (Calips) et 1-16 (Tangopaso) sont sous licence CC-BY-SA.

La figure 1-6 (Kogo) est sous licence GFDL.

© Rodolphe Jobard pour toutes les autres figures de l'ouvrage

Dépôt légal : avril 2016

N° d'éditeur : 9452

Imprimé en Slovénie par GPS Group

En application de la loi du 11 mars 1957, il est interdit de reproduire intégralement ou partiellement le présent ouvrage, sur quelque support que ce soit, sans autorisation de l'éditeur ou du Centre Français d'Exploitation du Droit de Copie, 20, rue des Grands Augustins, 75006 Paris.

© Groupe Eyrolles, 2014, 2016, ISBN : 978-2-212-14189-4

La communauté industrielle européenne des systèmes d'avions pilotés à distance (RPAS en anglais)¹, ci-après dénommés « drones », est composée de deux groupes d'acteurs, industries et PME/PMI, qui comprennent chacun des fabricants, des opérateurs² et des fournisseurs de services (voir tableau 1 page suivante). Côté utilisateurs, le marché du drone civil est constitué de trois groupes : commerciaux, non commerciaux (incluant activités d'entreprise et recherche), et opérateurs gouvernementaux non militaires de vols étatiques et non étatiques.

Actuellement, dans l'Union européenne, les responsabilités en matière de réglementation incombent à l'Agence européenne de sécurité aérienne (AESA) pour les drones civils dont la masse maximale au décollage est supérieure à 150 kg, et aux autorités nationales de l'aviation³ pour les drones plus légers.

Concernant les opérations de drones civils, diverses réglementations nationales sont maintenant en place (Allemagne, Autriche, Danemark, France, Italie, Irlande, Tchéquie, Royaume-Uni, Suède), sur le point d'entrer en vigueur (Belgique, Finlande, Lituanie, Norvège, Suisse), ou en préparation (Espagne, Malte, Pays-Bas). Ces réglementations concernent principalement les drones légers et ne sont pas harmonisées au niveau paneuropéen. L'entrée en vigueur de ces réglementations assez récentes dans la plupart de ces pays a suscité une augmentation dynamique du nombre d'opérateurs de drones approuvés et autorisés fournissant des services d'opération aérienne, avec une diversité d'applications toujours croissante (voir tableau 2 page VII).

-
1. RPAS (*Remotely Piloted Aircraft System*, système d'avions pilotés à distance) et RPA (*Remotely Piloted Aircraft*, avion piloté à distance). Ces deux termes sont recommandés par l'Organisation de l'aviation civile internationale pour un usage technique courant au lieu de UAS (*Unmanned Aircraft System*, système d'avions sans pilote) et UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*), véhicule aérien sans pilote.
 2. Opérateurs : personnes, entreprises ou organisations engagées ou offrant de s'engager dans une opération de RPAS.
 3. L'autorité nationale de l'aviation de chacun des 28 états membres de l'UE est responsable dans son pays de la réglementation, de la certification et de l'autorisation d'opération des drones civils dont la masse de décollage est inférieure à 150 kg, de leurs équipes de vol (pilotes à distance et observateurs) et des opérateurs de drones employant l'équipe de vol.

Tableau 1. Communauté industrielle des drones

SECTEUR	ACTIVITÉ	PRODUIT/SERVICE
Industries > 250 employés et CA > 50 millions d'euros	Études et conception Production Intégration	Système
		Sous-système
		Composants
		Formation pilote
		Formation maintenance
		Formation charge utile
		Formation opérateur
	Producteur/opérateur	Travaux aériens
	Opérateur	Travaux aériens
	Recherche & essais	
	Autres services	
PME/PMI ≤ 250 employés et CA ≤ 50 millions d'euros	Études & conception Production Intégration	Système
		Sous-système
		Composants
		Formation pilote
		Formation maintenance
		Formation charge utile
	Producteur/opérateur	Travaux aériens
	Opérateur	Travaux aériens
	Entité qualifiée	Évaluation
	Éducation/formation	Formation pilote
		Formation maintenance
		Formation charge utile
		Formation opérateur
		Autres
	Recherche & essais	
	Autres services	

Source : Blyenburgh

Par souci de simplicité, opérateurs approuvés⁴ et autorisés⁵ sont, ci-après, conjointement appelés « opérateurs certifiés⁶ ». En fait, il y a aujourd'hui plus de 1 700 opérateurs de drones civils certifiés dans l'Union européenne. Le décret entré en vigueur en France en avril 2012 a rendu possible la certification d'environ 650 opérateurs de drones civils, faisant de la France le pays comptant le plus d'opérateurs certifiés de drones civils au monde : cela est une démonstration claire de l'effet créatif d'emploi qui peut être produit par les drones.

-
- Opérateurs approuvés : opérateurs approuvés par l'autorité nationale de l'aviation, dans les pays ayant une réglementation en place.
 - Opérateurs autorisés : opérateurs autorisés par l'autorité de l'aviation nationale, dans les pays sans réglementation en place, où les autorisations sont délivrées au cas par cas.
 - Opérateurs certifiés : opérateurs ayant une sorte de reconnaissance officielle de conformité aux exigences applicables, par la délivrance d'un certificat attestant de cette conformité.

Tableau 2. Travaux aériens réalisés avec des drones civils

COMMERCIAUX ET NON COMMERCIAUX (Y COMPRIS OPÉRATIONS D'ENTREPRISE)	ENTRAÎNEMENT/INSTRUCTION AU VOL	AUTRES	LEXIQUE DES TERMES UTILISÉS DANS LE TABLEAU
Publicité aérienne Inspection aérienne Monitoring aérienne Observation et surveillance aériennes Patrouille et repérage aériens Photographie, vidéo, TV, cinéma aériens Aérophotogrammétrie et cartographie aériennes Pulvérisation et épandage aériens de solides Activités de recherche et scientifiques Assistance à la recherche et au secours de personnes	Duo (instruction d'un étudiant par un pilote avec licence) Solo (vol par un étudiant sans aide) Check (vérification ou qualification d'un pilote avec licence)	Essai, expérimental Démonstration Convoyage/ positionnement Salon aéronautique, course, démonstration publique	Inspection : examen dans le but de trouver des fautes, erreurs, problèmes, défauts ou phénomènes spécifiques. Monitoring : observation régulière pendant une période donnée. Observation : examen d'une activité, d'une personne, d'un groupe, d'une zone ou d'un phénomène. Patrouille : recherche d'une activité, d'un objet, d'une personne, d'un groupe ou d'un phénomène spécifique dans une zone déterminée. Repérage : recherche et enregistrement des coordonnées géographiques d'une activité, d'un objet, d'une personne, d'un groupe ou d'un phénomène. Surveillance : observation rapprochée d'une activité, d'une personne, d'un groupe, d'une zone ou d'un phénomène. Aérophotogrammétrie : inspection détaillée d'une zone de la surface de la terre géoréférencée (y compris des structures) dans le but d'étudier ou de mesurer des altitudes, angles, distances, phénomènes du terrain et des structures survolés.

Source : Blyenburgh

Dans pratiquement tous les cas, les opérations actuelles de vol de drones ont lieu à vue (en visibilité directe du pilote), à une altitude de vol inférieure à 152,4 m (500 pieds) au-dessus du sol, avec des drones ayant une masse de décollage maximale inférieure à 25 kg, qui sont principalement produits et opérés par des PME/PMI. Il est intéressant de noter que la réglementation française en matière de drone contient une disposition sur la conduite d'opérations au-delà du champ visuel. Il doit aussi être mentionné qu'un nombre significatif d'autorités nationales de l'aviation européenne facilitent les opérations de drones en accordant des autorisations au cas par cas. La communauté industrielle européenne des drones, dans laquelle la France tient une première place, a maintenant pour objectif de lancer des activités qui permettront de commencer à élargir le domaine des vols autorisés et à opérer de plus grands drones.

Un nombre croissant d'autorités gouvernementales de divers pays de l'UE, chargées des questions de sécurité interne (par exemple, polices municipale et nationale, unités anti-terroristes, brigades municipales de pompiers, pompiers forestiers, garde-côtes, défense civile, agences de protection de l'environnement), aussi bien que l'agence européenne Frontex, responsable de la sécurité des frontières de l'UE, ont manifesté un grand intérêt pour l'utilisation des drones. De plus, de grandes entreprises (par exemple, opérateurs de réseaux électriques, exploitants de pipelines, exploitants de chemins de fer, compagnies pétrolières) ont pris conscience que les drones pouvaient remplir des fonctions qui seraient économiquement très avantageuses pour leurs activités. Cependant, dans tous les cas, l'utilisation non militaire de drones dépendra de l'acceptabilité du coût de l'heure de vol proposé.

La communauté européenne des drones civils s'est développée substantiellement, a parcouru un long chemin en relativement peu de temps, et se trouve maintenant sur la route de l'intégration progressive des drones dans l'espace européen. Toutes les parties intéressées, et en particulier la communauté industrielle européenne des drones, doivent maintenant faire preuve de compréhension et de maturité, et travailler ensemble en coordination avec la Commission européenne et en suivant les lignes directrices définies par la feuille de route européenne sur les drones. Elles franchiront ainsi les dernières étapes sur la route vers la pleine intégration des drones, leur libre circulation et celles de leurs services à l'intérieur de l'Union européenne. Ce faisant, elles ne serviront pas seulement elles-mêmes, mais feront aussi une immense faveur à la communauté mondiale des drones, en lui montrant que la pleine intégration des drones est effectivement un objectif accessible.

Cet ouvrage de Rodolphe Jobard, l'un des pionniers français dans le domaine de l'utilisation de drones civils, contribuera sans nul doute à ce processus, en fournissant une introduction pratique au monde fascinant des drones.

Peter van Blyenburgh

Président d'UVS International⁷

www.uvs-international.org & www.uvs-info.com

7. UVS International, association à but non lucratif enregistrée à la Chambre de commerce et d'industrie de La Haye (Pays-Bas), dédiée à la promotion des drones et exerçant ses activités à partir de bureaux situés à Paris, représente plus de 850 sociétés et organisations (fabricants, opérateurs, fournisseurs de services, y compris écoles de pilotage) dans 41 pays.

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier vivement Peter van Blyenburgh, président d'UVS International, d'avoir accepté de préfacier mon livre. Un grand merci aussi à mon éditeur Antoine Derouin pour son suivi attentif tout au long de ce projet.

Pour leurs participations, je remercie également :

- *Raymond Rosso, ingénieur général honoraire des ponts, des eaux et des forêts ;*
- *Stéphane Querry, fondateur et cogérant de Polyvionics ;*
- *Vincent Tournadre, photogrammètre doctorant à l'Institut national de l'information géographique et forestière ;*
- *et tous les contributeurs de photos dans l'ouvrage.*

Et bien sûr, un grand merci à ma maman pour ses relectures, et à ma compagne pour sa patience !

TABLE DES MATIÈRES

AVANT-PROPOS	1
De quoi traite ce livre ?	1
Comment est-il structuré ?	1
À qui s'adresse-t-il ?	2
 Chapitre 1. DES DRONES MILITAIRES	
AUX DRONES CIVILS	3
Petite histoire des drones militaires	3
Premiers prototypes	3
Durant la Seconde Guerre mondiale	5
Fin du conflit et guerre froide	8
Lutte contre le terrorisme	11
Début de la miniaturisation	13
Avenir des drones militaires	15
Avènement des drones civils	19
Évolutions et ruptures technologiques	19
Nouveaux matériaux de construction	21
Du loisir aux applications professionnelles	21
 Chapitre 2. ANATOMIE D'UN DRONE	25
Des drones de toutes les formes	25
Voilures fixes	26
Voilures tournantes	28
Autres designs : ailes souples, ailes battantes, drones convertibles	36
Pourquoi cette diversité de formes ?	39
Principaux composants du véhicule	42
Autopilote	42
Actionneurs	47
Système de liaison	47

Chaîne de motorisation	48
Comment répartir les composants dans un drone ?	53
Charge utile.....	54
Intégration dans une voilure fixe	55
Intégration dans une voilure tournante	55
Équipements au sol	56
Équipements de contrôle.....	56
Équipements de retour vidéo	59
Équipements informatiques.....	61
Moyens de lancement et de récupération	62
Moyens de lancement.....	62
Moyens de récupération	63
Dispositifs de sauvegarde et de sécurité	64
Chapitre 3. COMMENT VOLE UN DRONE ?.....	67
Un peu de théorie	67
Domaine de vol.....	68
Cas des voilures fixes	69
Cas des voilures tournantes.....	71
Comment se dirige un drone ?.....	72
Cas des voilures fixes	73
Cas des voilures tournantes.....	75
Importance de la météo	80
Vent	80
Courants ascendants et descendants.....	81
Nuages et pluie	81
Chapitre 4. COMMENT TÉLÉPILOTER UN DRONE ?...	83
Différents types de télépilotage	83
Télépilotage à vue directe.....	83
Vol en immersion par vidéo transmission.....	84
Vol à la souris d'ordinateur	86
Différents modes de vol	86
En mode stabilisé (aidé)	86
En mode stationnaire (Position Hold)	87
En mode Retour à la maison (Return To Home)	87

Atterrissage et décollage automatiques.....	87
En mode de navigation automatique	88
Autres modes de vol	92
Simulation du vol.....	93
Contrôle du vol et de la charge utile	93
Risques du vol automatique.....	96
Analyse des paramètres de vol	97
Analyse des trajectoires.....	97
Analyse d'autres capteurs	98
Chapitre 5. À QUOI SERT UN DRONE ?	101
Applications médias	101
Photographie aérienne	101
Vidéo	107
Surveillance.....	109
Drones de surveillance.....	109
Limites des drones civils de surveillance	110
Agriculture et environnement.....	111
Mesure de la santé d'un champ.....	111
Épandage	112
Recensement de la flore et de la faune	113
Relevés topographiques.....	114
Extraction de courbes	118
Calcul d'un volume à partir d'un MNS.....	120
Évolution d'un paysage	123
Limites de la photogrammétrie par drone.....	123
Inspection d'ouvrages ou de matériel.....	125
Transport d'objets	127
Contraintes et limites des drones	127
Chapitre 6. RÉGLEMENTATION DES DRONES.....	129
Démarches administratives	130
Scénarios de vol.....	132
Scénario S_1	134
Scénario S_2	134
Scénario S_3	135

Scénario S ₄	137
Restriction des espaces de vol	138
Limites de la réglementation	140
Vols basse hauteur de l'armée	142
Protection de la vie privée et antidrones	142
Chapitre 7. COMMENT DÉBUTER AVEC UN DRONE EN KIT ?	147
Quelques précautions avant le montage	147
Pour ne pas se blesser	147
Pour ne pas griller les circuits	148
Pour ne pas perdre de pièces	148
Outils et savoir-faire requis	149
Montage du drone	149
Câblage et soudage	150
Installation de logiciels	152
Quel drone choisir ?	152
Option 1 : acheter du prêt à voler.....	153
Option 2 : intégrer son propre matériel.....	155
Option 3 : utiliser un drone open source	155
Montage d'un drone : construction d'un petit quad	156
Éléments constitutifs du quad	156
Étapes du montage	157
Étapes du câblage.....	159
Premiers vols du drone	162
Consignes de sécurité spécifiques	163
Apprendre à piloter	163
Réglage des gains	165
Pourquoi le drone ne vole-t-il pas ou mal ?	166
CONCLUSION	169
Annexe A. RESSOURCES UTILES	171
Annexe B. GLOSSAIRE	177
INDEX	185

L'homme domestiqua le feu. Il inventa la roue, l'agriculture, l'écriture, la poudre à canon, la boussole, l'électricité. Puis il se demanda si, plutôt que de se risquer à monter dans un avion pour observer ou bombarder l'ennemi, un drone pouvait le faire à sa place. Les frappes controversées des drones militaires en Afghanistan et au Yémen ont marqué dans les années 2000. Depuis, il ne se passe pas une semaine, du Salon de l'agriculture aux états-majors des grands groupes industriels, sans qu'une nouvelle application civile soit annoncée.

De quoi traite ce livre ?

Faut-il encore rappeler ce qu'est un drone ? C'est un avion ou un hélicoptère sans pilote à bord. On le croyait réservé au champ de bataille ou à la cour de récréation, mais il arrive en fait au-dessus de nos têtes pour rendre de nombreux services. Il remplace les cinq sens de l'homme par des capteurs, qui peuvent être promenés à souhait dans les trois dimensions. Une véritable ubiquité. Les drones civils sont encore plus difficiles à éviter que leurs aînés militaires car ils s'infiltrant dans de nombreux secteurs d'activité : ordre public, médias, agriculture, industrie, transport... Faciles à utiliser et bon marché, ils sont sur le point de provoquer une nouvelle révolution industrielle.

Les drones, tout le monde en a déjà entendu parler. Mais en les voyant voler, peut-être vous êtes-vous déjà demandé pourquoi certains ont plusieurs paires de rotors ou une aile fixe ? s'ils sont difficile à piloter ? jusqu'à quelle hauteur ils peuvent monter ? s'il est légal d'en faire voler à tel endroit ? comment traiter les données ? Ce livre d'introduction aux drones, principalement civils, répondra à toutes ces questions et à bien d'autres encore. Abondamment illustré par des photos et schémas, il dresse un état des lieux des techniques actuelles et de leurs applications.

Comment est-il structuré ?

Cet ouvrage est découpé en sept chapitres.

- Le premier chapitre est un petit historique des drones, expliquant comment ils sont passés du militaire au civil. Comme toute innovation, ils se sont nourris de technologies qui ne leur étaient pas destinées à l'origine : batteries au lithium, moteurs électriques nouvelle génération, robotique, téléphonie mobile, GPS, appareils photo numériques...

- Le deuxième chapitre présente les différents types de drones, qui se sont affranchis des contraintes de l'aviation habitée pour se décliner en formes inédites, dominées par le drone multirotor. Tous les composants d'un système drone y sont détaillés, du véhicule à la station de contrôle, en passant par les appareils de lancement et de récupération.
- Le troisième chapitre explique comment fonctionnent les drones, en rappelant les grands principes du vol des « plus lourds que l'air ». Le lecteur comprendra mieux ainsi les performances à attendre en matière de stabilité, d'endurance, de vitesse ou de capacité d'empont. Les limitations météo sont également abordées.
- Le quatrième chapitre est consacré aux différentes façons de piloter ou plutôt de « télépiloter » un drone : en manuel et à vue, en immersion grâce à un retour vidéo en direct, ou à l'ordinateur équipé d'un logiciel de navigation cartographique. Le télépilotage est grandement facilité par des séquences de vol automatique qui rendent possibles certaines missions telles que la cartographie ou les panoramas. Le vol automatique soulève de nouveaux risques.
- Le cinquième chapitre passe en revue les différentes applications des drones civils. En particulier, il fournit divers conseils pour réussir ses photos ou vidéos aériennes, qui constituent toujours le principal débouché à l'heure actuelle. Il s'attarde également sur la photogrammétrie, la production d'images en deux ou trois dimensions, qui connaît un grand succès parmi les topographes, ainsi que l'inspection d'ouvrages d'art. Le lecteur pourra ainsi faire la part des choses entre les applications sérieuses et les simples effets d'annonce.
- Le sixième chapitre traite du cadre légal dont relèvent les drones : qualifications des télépilotes, scénarios de vol, restrictions d'espace de vol... Les risques d'atteinte à la vie privée sont également couverts.
- Le septième et dernier chapitre est un atelier pratique expliquant au lecteur comment construire son propre drone et le faire voler. Les principales pannes et leurs remèdes ne sont pas oubliés !

À qui s'adresse-t-il ?

Ce livre est accessible à tous, aussi bien au particulier qui souhaite prendre des photos de sa maison secondaire, qu'au donneur d'ordres qui envisage une utilisation spécifique, ou encore au futur opérateur commercial qui se renseigne sur les démarches administratives. Il intéressera également tout curieux de cette technologie... en plein envol !

DES DRONES MILITAIRES AUX DRONES CIVILS

« L'aéronautique, ce n'était pas une industrie, ce n'est pas une science. C'était un miracle ! »

Igor Sikorsky

Les militaires furent les premiers, dès le début de l'aviation, à s'intéresser aux avions sans pilote à bord. D'abord bombes volantes, puis avions cibles, puis avions de reconnaissance, la technologie arriva à maturité dans les années 1970. L'utilisation de satellites pour le positionnement géographique et la communication ouvrirent la voie aux drones de surveillance à partir des années 1990. Une fois abordables, ces technologies donnèrent naissance aux drones civils.

Petite histoire des drones militaires

Beaucoup pensent que les drones sont apparus lors de la deuxième guerre du Golfe, sous l'ère de W.W. Bush, avec des frappes au Pakistan ou au Yémen. En fait, les militaires ont essayé de faire voler des avions sans pilote à bord dès le début de l'aviation. Le drone s'est décliné, au fil du temps, en bombe volante, en engin cible, en drone de surveillance, ou de reconnaissance, en leurre, en drone du fantassin...

PREMIERS PROTOTYPES

L'aviation, initiée à la fin du XIX^e siècle par quelques casse-cou et bricoleurs de génie, intéresse très vite les militaires qui s'en emparent dès la première guerre mondiale pour observer et attaquer l'ennemi par les airs. Animés d'un esprit très chevaleresque, les premiers combats aériens font cependant une hécatombe parmi les as du pilotage. L'idée de fabriquer des avions sans pilote à bord ne met pas longtemps à germer parmi les militaires ; mais il fallait pour cela pouvoir contrôler et téléguider le vol. Or le téléguidage sans fil a été mis en œuvre dès 1898 sur un bateau nommé le Teleautomaton, par l'Américain d'origine serbe Nikola Tesla. Quant à l'Américain Elmer Ambrose Sperry, il a mis au point en 1909 un gyroscope, ancêtre de la centrale inertielle, destiné à l'origine à la stabilisation des avions. Tous les ingrédients sont alors prêts pour les premiers vols automatiques.

Les drones ont donc d'abord été imaginés pour bombarder l'ennemi. En octobre 1918, un Américain lance la première bombe volante : un petit biplan de 4 m d'envergure, nommé Kettering Bug, qui est un missile rudimentaire mais capable de parcourir 120 km avec 85 kg d'explosif.



Figure 1-1. Le Kettering Bug, véritable torpille volante

Pour régler la distance du vol, les opérateurs prédéterminent un nombre de tours de moteur et, dès que ce nombre est atteint en vol, le moteur se coupe, une aile bascule et l'appareil part en piqué pour s'écraser. Produit en 45 exemplaires, le Kettering Bug n'a jamais été utilisé en opération car l'état-major estimait que cet engin faisait courir autant de risques aux troupes ennemies qu'aux troupes alliées.

Par ailleurs, on retiendra que les Français, en septembre 1918, arrivent à faire parcourir 100 km en circuit fermé à un vieux Voisin VIII télécommandé.

Mais il faudra attendre deux décennies pour rendre véritablement opérationnelles les bombes volantes, du fait du manque de précision et du risque de brouillage radio. Durant l'entre-deux guerres, le concept dominant est le drone cible pour entraîner les opérateurs de batteries anti-aériennes ou les aviateurs : il est en effet moins risqué de téléguider des cibles plutôt que de les traîner en vol derrière soi. C'est aussi un moyen de recycler le stock considérable d'avions réformés de la première guerre ; ainsi, les Anglais, à la fin des années 1930, transforment leur biplan Tiger Moth en avion cible, surnommé Queenbee.

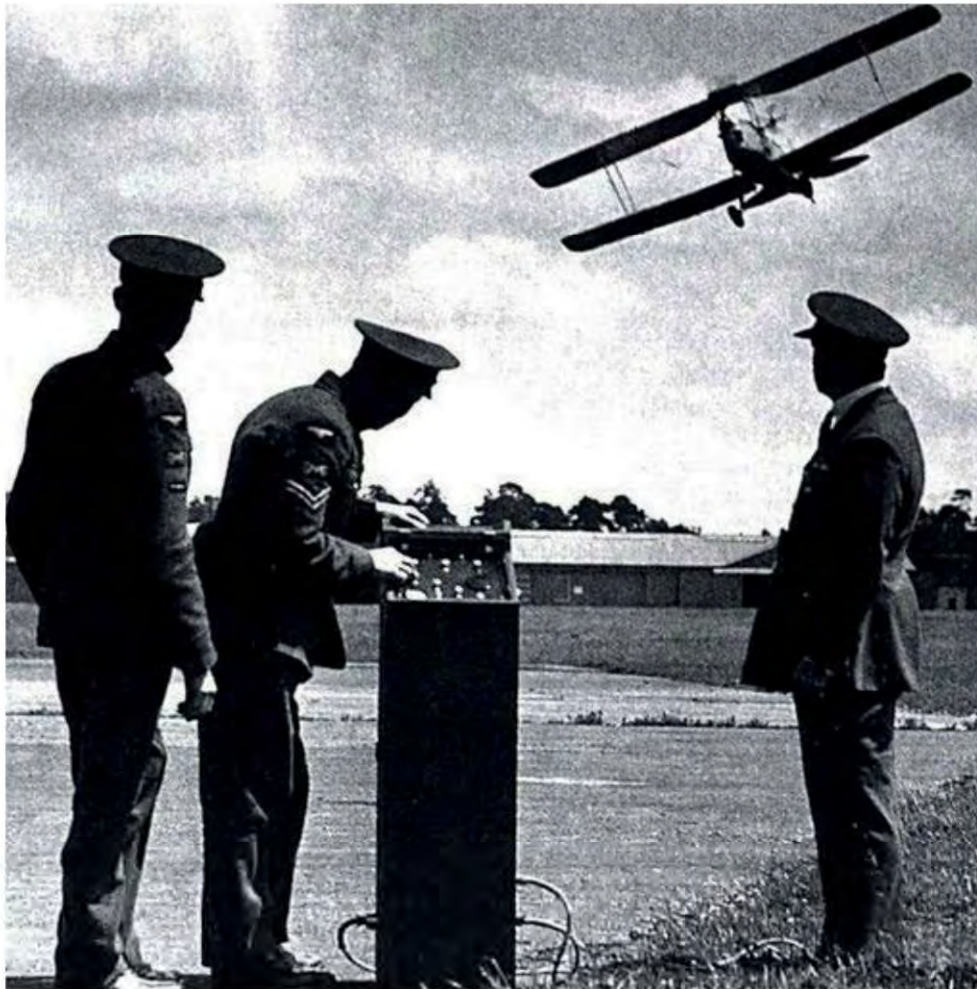


Figure 1-2. L'avion cible britannique Queenbee

DURANT LA SECONDE GUERRE MONDIALE

Sans égaler l'aviation, les drones ont eu leur lot de célébrités. Jusque dans les années 1940, la société Radioplane, située près d'Hollywood, était le fabricant de drones cibles le plus en vogue. La jeune Norma Jean Dougherty, rendue célèbre sous le nom de Marilyn Monroe, y travaillera un temps, avant d'embrasser la carrière qu'on lui connaît.

Joe Kennedy, fils aîné du clan Kennedy, participe en 1944 à une mission très périlleuse : faire s'écraser un avion téléguidé rempli de dynamite sur une base de missiles allemands V3, dans le nord de la France. Joe devait monter à bord, le faire décoller, amorcer les dynamites et sauter en parachute. Le téléguidage par lien radio et télévision devait ensuite être assuré par un avion d'escorte. Malheureusement, l'avion explosa dans le ciel avant que Joe eut le temps de sauter ; on ne sut jamais ce qui s'était réellement passé.



Figure 1-3. Marilyn Monroe, travaillant dans les ateliers Radioplane en 1944

Les Allemands, de leur côté, avaient d'autres projets que des cibles pour les drones. De toutes les forces engagées dans le deuxième conflit mondial, ils sont les seuls à employer de façon opérationnelle des quantités industrielles des bombes volantes ou planantes : d'abord le V1, un engin de 6 m d'envergure pour 8 m de long, capable d'emporter près d'une tonne d'explosif à 200 km, avec une précision d'environ 12 km à 600 km/h. Le V1 était moins destiné à détruire des installations qu'à saper le moral des alliés.

Il fut remplacé par le V2 aux performances bien supérieures, car propulsé par un moteur-fusée, avec une portée de 320 km et une vitesse de 5 000 km/h. Cet engin, presque invulnérable, volait aux limites de l'espace.



Figure 1-4. Un V1 manœuvré par des militaires allemands



Figure 1-5. Le V2

Durant cette période, les Allemands ont pu étendre encore leur savoir-faire technologique en mettant au point d'autres modèles. Ainsi, en septembre 1943, un cuirassier italien, le Roma, passé dans le camp allié, fut touché avec une précision inédite par une bombe planante, la Ruhrstahl SD 1000. Une fois larguée, cette bombe était téléguidée par l'équipage jusqu'à l'impact. D'autres bateaux subirent le même sort avec des bombes plus avancées, telles que la Henschel HS 293. Du côté allié, des parades sont mises au point, comme le brouillage radio ou la destruction de l'avion de guidage.



Figure 1-6. La bombe planante Henschel HS 293

FIN DU CONFLIT ET GUERRE FROIDE

La supériorité technologique des Allemands en matière de vol automatique et de guidage était manifeste. C'est pourquoi, en pénétrant en Allemagne, les alliés rivalisèrent pour récupérer leur matériel et leur personnel : le matériel fut copié en *reverse engineering* et le personnel fut « essaimé » dans chaque bloc côté vainqueurs. Ainsi, Wernher von Braun, le père des V1 et V2, continua à développer des fusées aux USA et avec des budgets multipliés.

Comme après la première guerre mondiale, les militaires disposent en 1945 d'un grand stock d'avions dont il faut bien faire quelque chose. Les Américains optent pour une transformation des Hellcat Phantom en drones afin de prélever des échantillons d'air après les essais de bombes atomiques dans les îles du Pacifique.

Mais c'est la guerre froide qui va donner un nouvel élan au développement d'engins sans pilote. Envisageant le cas de déferlantes de chars en Europe, l'artillerie avait besoin, en premier lieu, de se doter de moyens efficaces de reconnaissance. Cette mission très périlleuse pour des avions habités engendra la naissance du drone tactique (appelé aussi drone de reconnaissance) : il s'agit d'un bolide passant à basse altitude au-dessus d'un champ de bataille pour prendre des photos de cibles conventionnelles ou nucléaires, puis il est récupéré en parachute et les films aussitôt développés. Utiliser un drone pour l'armée de terre, au plus

près du champ de bataille, plutôt que d'appeler l'aviation, accélère le temps de traitement et la riposte. C'est pourquoi les Français s'inspirent dans les années 1950 des V1 allemands pour développer de petits drones tactiques transportés par camions, des CT-10 et CT-20, puis les R20.



Figure 1-7. Le drone tactique R20

Son héritier plus récent est le drone SDTI (Système de drone tactique intérimaire) : un drone de 4 m d'envergure à hélice catapulté, pouvant voler 5 h au maximum et dont l'atterrissage s'effectue par parachute. Il sera utilisé notamment au Kosovo et en Afghanistan.



Figure 1-8. Le drone SDTI

D'un point de vue stratégique, les militaires ne veulent pas cantonner les drones à des excursions sur un champ de bataille imaginaire, car les blocs de part et d'autre du rideau de fer avaient cruellement besoin de s'épier, même s'ils étaient officiellement en paix. Les Américains utilisaient pour cela des avions U2, à haute altitude au-dessus de l'Union soviétique. En mai 1960, l'un d'eux est abattu et les images diffusées d'un membre indemne de l'équipage servent la propagande soviétique. Cet épisode choque l'opinion et accélère le développement d'avions de reconnaissance inhabités, capables d'évoluer profondément en zones hostiles.

La crise de Cuba en 1962 ne fait que renforcer ce besoin d'espionnage, mais à l'époque rien n'est prêt. Le Ryan147 BQM-34, plus connu sous l'appellation Lightning Bug, est un avion de reconnaissance sans pilote de moins de 5 m d'envergure, largable par avion et récupérable par parachute. Il vole pour la première fois en 1964, au-dessus de la Chine, mais c'est au Vietnam qu'il sera principalement utilisé avec plus de 3 400 sorties. Certains sont descendus et récupérés par les troupes adverses pour le développement de leurs propres systèmes de surveillance.

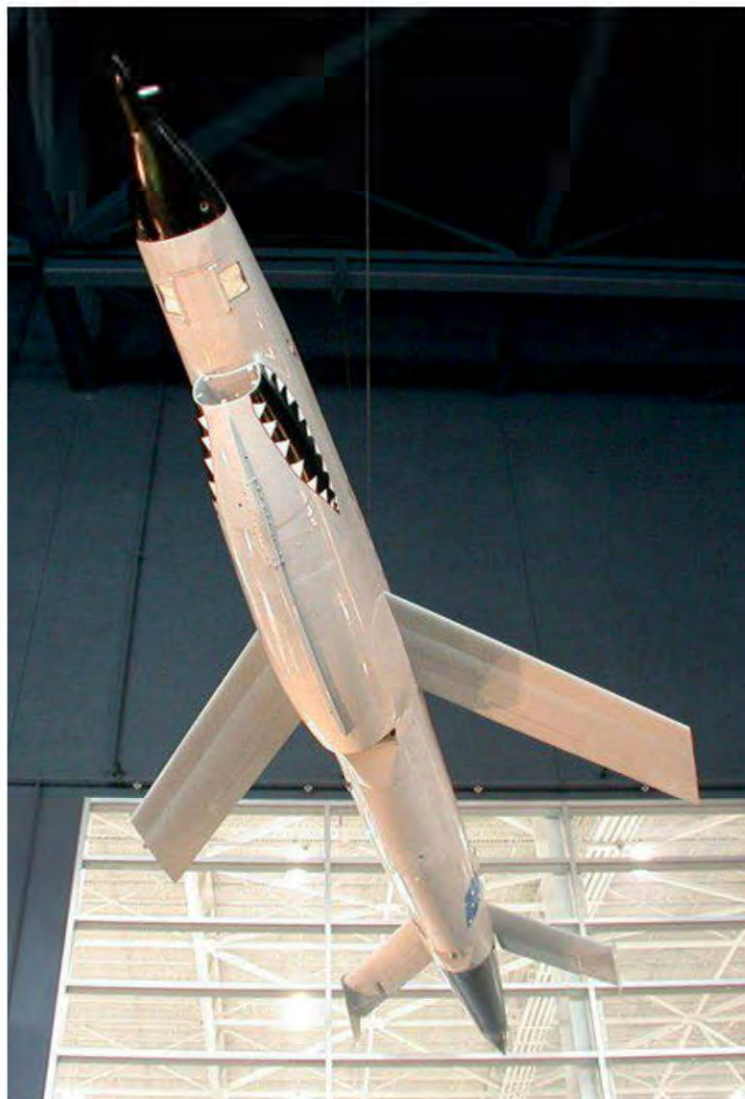


Figure 1-9. Le Lightning Bug, drone de reconnaissance durant la guerre froide

Les drones employés opérationnellement par les Américains pendant la guerre froide ont certes connu un succès indéniable mais ils ont aussi démontré leur vulnérabilité face aux batteries anti-aériennes et aux avions de chasse. Subissant des défaillances et des avaries, la technologie de liaison ou de navigation n'étant pas encore parfaitement au point, les drones perdent de l'intérêt aux yeux des Américains, qui une fois rentrés du Vietnam, les ont un peu délaissés.

LUTTE CONTRE LE TERRORISME

En 1982, les Israéliens allaient reprendre le flambeau du développement des drones de façon spectaculaire. Au cours de l'opération « Paix en Galilée », ils utilisent des drones d'observation de façon coordonnée avec des avions habités lors de l'assaut de Beyrouth, mais aussi des petits drones comme leurres pour aveugler la défense adverse. Rapidement, ils obtiennent la maîtrise du ciel pour mener leurs opérations terrestres. La permanence du risque terroriste dans ce pays va être un fort aiguillon pour inciter les Israéliens à rester à la pointe de l'industrie du drone et ils vont s'imposer comme les leaders avec les Américains pour cette technologie, qu'ils exportent à plus de 70 %, notamment en Afrique du Sud.

Les attentats du 11 septembre 2001 contre les tours du World Trade Center à New York seront à l'origine d'une coalition visant à traquer Al Quaida en Afghanistan dès la même année, puis en Irak à partir de 2003. Dans ces campagnes, la doctrine sous-jacente est de limiter au maximum l'exposition des troupes grâce à la permanence et l'exactitude du renseignement et de mener une guerre « zéro mort » loin du sol américain. Il fallait donc disposer d'un moyen assurant une surveillance longue durée d'un objectif.

Le drone MALE (*Medium altitude long endurance*) dont la figure est le Predator de General Atomics, répond à ce besoin. Il est en rupture avec tous les drones construits jusqu'alors, car spécialement conçu pour les vols longue durée, de surveillance, télépilotes à des milliers de kilomètres. D'une envergure de 16 m, avec des ailes à grand allongement, ressemblant à celles des planeurs, il est propulsé par un moteur à hélice. La bosse de son fuselage contient l'antenne de communication satellitaire. Son empennage en V, moins haut qu'un empennage classique, le rend plus facile à ranger. Il peut voler pendant 40 heures à 7 000 m d'altitude et parcourir 12 000 km selon les versions. Testé dans les Balkans dès 1995, c'est la campagne d'Afghanistan qui va en faire une pièce essentielle du dispositif allié de renseignement.



Figure 1-10. Le MALE Predator

Ce rôle était jusqu'alors dévolu aux satellites, mais les drones sont plus flexibles car ils peuvent voler là, où et quand cela est nécessaire, alors qu'un satellite a une trajectoire fixe et qu'il faut attendre son passage en orbite. De plus, les images fournies par les drones sont de meilleure qualité car prises à moindre distance. Plutôt que de concurrencer les drones, les satellites les aident pour la navigation grâce au positionnement géographique, le GPS (*Global Positioning System*) mis au point dans les années 1990. Ils relaient aussi la transmission de données pour le contrôle du vol et la réception des images en direct.

Le Predator va aussi inventer une nouvelle mission : le drone d'attaque. Jusqu'alors, les drones se contentaient de repérer des objectifs, qui étaient ensuite détruits par l'aviation ou l'artillerie. Ce qui change avec le Predator, c'est qu'étant armé, il se charge lui-même de la deuxième partie de la mission et peut aussi vérifier l'étendue des dommages. Il s'ensuit un raccourcissement spectaculaire du temps de traitement et une précision accrue. Il tire ses premiers missiles Hellfire en 2001 en Irak puis au Yémen.

Les MALE ont cependant un inconvénient : ils sont lents, 200 km/h au plus. Cela leur fait perdre du temps de voyage vers un objectif lointain, ce qui se traduit par moins de temps passé sur l'objectif. Les drones HALE (*High Altitude Long Term Endurance*) y remédient car ils volent trois fois plus vite grâce à leur réacteur. Par exemple, le RQ-4 Global Hawk de Northrop Grumman peut voler jusqu'à 18 000 m (50 000 Ft) ; il a les dimensions d'un avion de ligne (40 m d'envergure) et dispose de près de 40 heures d'autonomie.



Figure 1-11. Le HALE Global Hawk

Le succès opérationnel de vecteurs aussi nouveaux que les drones dépend en grande partie de leur acceptation par les forces militaires. En France et aux États-Unis, des divergences existent entre l'armée de terre et l'armée de l'air au sujet de la formation requise pour les utiliser. Pour piloter un drone de l'armée de l'air, il faut avoir suivi une formation de pilote d'avions habités, contrairement aux drones de l'armée de terre. Aux USA, les deux armées ont leurs propres Predator, mais l'armée de l'air souhaite contrôler le vol manuellement, tandis que l'armée de terre fait plus volontiers confiance aux modes automatiques. Il en

ressort... plus d'accidents sous commandement des aviateurs. Avec plus de 700 drones de toutes sortes en Irak, les militaires ont eu à se poser la question de leur insertion dans le trafic aérien.

En France, l'armée de l'air a privilégié les avions habités (Rafale et avion de transport A400M) au détriment des drones. N'ayant pas développé en propre de drone MALE, les militaires français coopèrent avec les Israéliens pour franciser le drone israélien Heron, renommé Harfang, dont quatre sont utilisés en Afghanistan dès 2010, ainsi qu'en Libye ou au Mali. Ils sont remplacés depuis par des MQ9 Reaper.



Figure 1-12. Le MALE Harfang

DÉBUT DE LA MINIATURISATION

Au début des années 2000, la miniaturisation des technologies rend possible le développement de drones portables dans un sac à dos. Équipé de la sorte, un fantassin peut voir derrière une colline ou un immeuble si un ennemi est en embuscade, tout en restant à l'abri. Le drone devient une sorte de jumelle déportée. La société américaine AeroVironment crée le RQ-11 Raven, un minidrone à voilure fixe d'1,3 m d'envergure et de moins de 2 kg. Doté d'une caméra et d'un retour vidéo, son rayon d'action est de 10 km. Le fantassin le lance à la main, puis surveille pendant le vol les images par retour vidéo sur un écran. À l'atterrissage, l'empennage bascule et le drone se laisse chuter. Lors de l'impact au sol, les ailes et le fuselage se démantèlent en plusieurs morceaux et le tout est facilement remis en place pour un autre vol. Toutes ces caractéristiques lui ont assuré un réel succès et il a été vendu à 20 000 exemplaires dans plus de 20 pays.

La société canadienne Aeryon Labs, quant à elle, produit un quadcoptère de moins de 2 kg, le Aeryon Scout, destiné à la collecte de renseignements en milieu urbain. La charge utile est constituée d'une caméra gyroscopique stabilisée et le temps de vol est d'environ 25 min. Le temps de sa mise en œuvre est très rapide, il est très robuste et se pilote facilement. Ce modèle a été ensuite remplacé par le SkyRanger, plus performant.



Figure 1-13. Le RQ-11 Raven de AeroVironment



Figure 1-14. Le minidrone Aeryon SkyRanger

La miniaturisation franchit une nouvelle étape avec les nanodrones, qui tiennent dans le creux de la main. D'une extrême mobilité, ils se font oublier à la ceinture d'un fantassin et sont aussi très discrets en vol. Le constructeur norvégien Prox Dynamics en est le leader avec son Black Hornet de seulement 18 grammes, caméra et batterie comprises. Il peut être utilisé au contact de l'ennemi pour recueillir des informations sans se faire repérer, par exemple dans le cas d'une prise d'otages. Il a déjà été vendu à cinq armées dans le monde. Des recherches sont en cours pour pouvoir continuer à piloter les nanodrones même après leur entrée dans un bâtiment.



Figure 1-15. Le nanodrone Black Hornet de Prox Dynamics

AVENIR DES DRONES MILITAIRES

Les états-majors inventent de nouveaux concepts comme le drone de combat, le drone suicide ou le drone captif. Mais les drones de combat peuvent-ils remplacer les avions de chasse ? Il faut pour cela une certaine agilité, furtivité et autonomie. Encore expérimental à ce jour, le drone de combat UCAV (*Unmanned Combat Aerial Vehicle*) répond à cette ambition. Parmi eux, le Dassault Neuron, dont la maquette a été présentée au Salon du Bourget de 2011, est un démonstrateur qui a volé pour la première fois en décembre 2012.



Figure 1-16. Maquette au 1/1 du Neuron au Salon du Bourget de 2011

Le drone suicide est un minidrone doté d'une charge explosive, capable de vol stationnaire au-dessus de l'adversaire, sans être détecté. Son opérateur observe l'environnement depuis le retour vidéo du drone. Si la cible est confirmée, il laisse le drone fondre sur lui. Dans le cas contraire, il peut le ramener à sa base pour être utilisé ultérieurement. Une véritable épée de Damoclès. Les drones de la société israélienne UVision se rangent dans un cylindre, transportables à dos d'homme. En s'éjectant de son tube, le drone déploie des ailettes qui lui assurent portance et contrôle.



Figure 1-17. Drone suicide Hero 30 de UVision, pesant 5 kg, lanceur compris

Autre innovation, le drone captif. L'idée est de faire voler un drone aussi longtemps que possible en l'alimentant en énergie électrique depuis un fil. Les données de contrôle et de télémétrie transitent également par ce fil, ce qui les rend invulnérables au brouillage. Ce type de machine, aux performances et au rayon d'action contraints par la longueur du fil, remplit des missions de surveillance de site ou sert de relais de transmission.

L'HoverMast de la société israélienne Sky Sapience a été le premier multir rotor captif opérationnel. D'un poids à vide de 10 kg, ce drone est équipé d'un rotor principal et de 4 rotors secondaires. Il peut voler à 50 m de hauteur et emporter 9 kg de charge utile, comme une caméra gyrostabilisée. Ce modèle a été suivi par celui de la société française Infotron en 2015, qui a sorti une version captive de son drone IT180.

Des USA à l'Europe, en passant par l'Iran ou l'Inde, plus de cinquante nations développent des drones militaires. Cette prolifération amoindrit l'avantage d'en posséder. Leur utilisation pour éliminer, sans coups de semonce, des membres d'organisations terroristes, fait polémique lorsque ces frappes militaires touchent des civils et dressent des populations entières contre eux. Le retour d'expérience de leur déploiement a également mis au grand jour leur vulnérabilité, notamment à la chasse, à la DCA, au brouillage, ou à la prise de contrôle. Les constructeurs réagissent en essayant de les durcir aux contremesures.



Figure 1-18. Le HoverMast de Sky Sapience posé sur son générateur électrique

Tableau 1-1. Quelques drones en service

NOM	PAYS	TYPE	ENDURANCE (HEURES)	RAYON D'ACTION (KM)	VITESSE MAX. KM/H	PLAFOND
SDTI	France	Drone tactique	5	200	240	3 800
Predator	USA	MALE	Jusqu'à 40 selon version	6 780	222	7 680
Global Hawk	USA	HALE	Jusqu'à 40 selon version	22 780	635	18 300
Neuron	Europe	UCAV	2	2 280	980	14 000

Avec le retrait des troupes occidentales d'Irak et d'Afghanistan, le marché des drones militaires se réduit brutalement au début de la décennie. Des tentatives ont lieu pour les vendre aux civils, mais elles sont plutôt infructueuses car, d'une part, ces drones sont surspécifiés (les civils n'ont pas forcément besoin de l'instantanéité de l'information et peuvent se permettre de perdre quelques minutes à les mettre en œuvre sur le terrain) et, d'autre part, les drones militaires et les drones à usage dual civil/militaire subissent des restrictions de commerce. Les premiers sont réglementés par l'*International Traffic in Arms Regulations*, organisme américain, dont les règles s'appliquent dans le monde entier. Il contrôle l'exportation « d'articles de défense » et de « services de défense » quelle que soit la destination. Les produits à usage double tombent sous la réglementation de l'*Export Administration Regulations* (EAR), aussi américain. Les contrôles font peser des risques de retards, des pénalités, voire des sanctions pénales. Enfin, les drones sont proposés à des prix beaucoup trop élevés, en raison notamment de certifications militaires. Toutefois, le regain de terrorisme dans les pays occidentaux depuis 2015 redonne du souffle au marché des minidrones de surveillance.



Figure 1-19. La Gendarmerie des transports aériens s'équipe aussi en drones. Ici, un Phantom de DJI.

En parallèle, les drones militaires sont en train d'inspirer une génération de jeunes entrepreneurs à développer des machines plus adaptées au civil. Les innovations technologiques des années 1990 et 2000 vont les aider.

Au début des années 2000, de nouvelles technologies améliorent les performances des drones militaires, conduisant à la naissance des drones civils.

ÉVOLUTIONS ET RUPTURES TECHNOLOGIQUES

Positionnement géographique : du gyroscope au GPS

Pour effectuer une mission, il est nécessaire de connaître précisément sa position dans l'espace. Jusque dans les années 1990, les pilotes automatiques ne pouvaient compter que sur eux-mêmes. Ils contenaient une centrale inertielle composée de gyroscopes mécaniques couplés à des compas magnétiques et des capteurs de pression. En mesurant les accélérations subies tout au long du vol, il était possible de déterminer une position. Outre le problème de fiabilité inhérente à la mécanique, leur précision se dégradait dans le temps et ils étaient lourds et encombrants. Le positionnement géographique par satellite (GPS), mis en service en 1995, a complètement changé la donne. On peut dorénavant se repérer en temps réel, en captant les signaux émis par des satellites, avec une antenne de la taille d'un ongle. Le principe est qu'une constellation de satellites (telles que le GPS avec 24 satellites, le GLONASS russe, le Beidou chinois et bientôt le Galileo européen) émettent en continu un signal codé contenant un horaire très précis, provenant d'une horloge atomique, et une position. La durée mise par le signal pour parvenir au drone est convertie en distance. Par trilatération, on interprète ces distances en position. Il faut pour cela recevoir au minimum le signal de quatre satellites, mais en recevoir six (ou plus) augmente la précision.

À l'origine mis en place pour l'armée américaine, le signal était sciemment dégradé pour le grand public, de sorte que la précision pour le civil était de l'ordre de 100 m. L'essor de cette technologie a vraiment démarré lorsque Bill Clinton a décidé en mai 2000 de mettre fin à cette dégradation volontaire. La précision obtenue est désormais de moins de 10 m et elle s'améliore encore avec l'augmentation du nombre de satellites émetteur de signaux.

Miniaturisation des MEMS

Des altimètres barométriques de 2 mm de long, un compas de la même taille, des accéléromètres de 3 mm... : les capteurs mécaniques d'antan sont à présent remplacés par des minicomposants sans partie mobile et sans entretien, appelés « microsystèmes électromécaniques » (MEMS), dont la production en masse est tirée par la téléphonie mobile. Ils prennent place sur le circuit intégré de l'autopilote qui peut aujourd'hui peser moins de 25 g avec ses capteurs, donc être installé sur un minidrone.

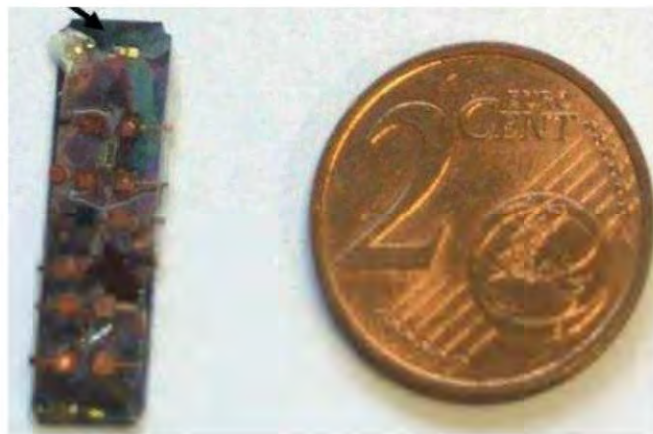


Figure 1-20. Exemple de MEMS

Liaison de données

Les drones militaires MALE ou HALE utilisent des liaisons satellitaires permettant une portée infinie. Les civils ne bénéficient pas de ce type de liaison, trop chère et dont l'antenne est trop grosse, mais ils profitent à partir des années 2000 du confort et de la sécurité des radios digitales. Les radios utilisaient jusqu'alors des signaux analogiques en 41 ou 72 MHz. Il y avait un risque d'interférences avec d'autres émetteurs ou d'être parasités par des moteurs électriques. Dans les années 2000 sont apparues les radios à plus haute fréquence, le 2,4 GHz en mode digital. Il devint possible de constituer un binôme avec un émetteur et un récepteur à la première mise en service : le récepteur ne reconnaît que les signaux émis par votre télécommande, rendant les interférences avec des tiers impossibles. Les liaisons deviennent bidirectionnelles : l'émetteur envoie des ordres de commandes en même temps qu'il reçoit des informations sur l'état des capteurs de bord. Autre avantage : l'émetteur n'a plus besoin de son antenne télescopique d'1 m d'antan et le récepteur d'un long fil qui devait être maintenu tendu à l'extérieur du fuselage. Aujourd'hui, 10 cm d'antenne émettrice ou réceptrice suffisent.

Motorisation : le moteur sans balais (ou machine synchrone autopilotée à aimants)

Ces moteurs équipent les Toyota Prius, les scooters électriques et les lecteurs de CD-Rom. Les moteurs sans balais (*brushless*) remplacent les moteurs à balais à partir des années 1980. Sans eux, les drones multirrotors (qui représentent 80 % du parc civil) n'auraient pas pu voir le jour.

Ils sont alimentés en courant continu, mais, contrairement à leurs aînés, ce courant passe par un commutateur externe au moteur, qui traduit le courant continu en courant triphasé alternatif. Ce commutateur contrôle la vitesse du moteur en modulant un nombre d'impulsions par seconde. Il élimine tous les inconvénients du moteur à courant continu classique : inertie, bien meilleur rendement, plus grande durée de vie.

Charges utiles : les appareils digitaux

Prendre des clichés, les visionner aussitôt, effacer et recommencer ; stocker des centaines de clichés par vol, pouvoir les retoucher ; se servir de l'objectif de l'appareil comme moyen de vidéotransmission au sol... Cette flexibilité d'emploi était impensable avant l'arrivée des appareils photo numériques, à la fin des années 1990. La qualité des capteurs numériques a définitivement supplanté les argentiques dès le milieu des années 2000. De nouvelles applications telles que la photogrammétrie par drone voient le jour. Sans cette technologie, les drones n'auraient jamais pris leur essor, car le développement de photos argentiques était cher et peu pratique.

NOUVEAUX MATÉRIAUX DE CONSTRUCTION

Les années 1980 et 1990 ont vu se démocratiser l'usage des matériaux composites et des mousses très résistantes. Un matériau composite est un assemblage d'au moins deux composants dont les propriétés se complètent : le matériau obtenu possède des propriétés (rigidité, légèreté) que ses composants, pris séparément, n'ont pas.

Légers et faciles à mettre en forme, ils remplacent progressivement l'aluminium, l'acier ou le titane des Airbus et Boeing, depuis les années 1980, pour représenter aujourd'hui près de 50 % du poids total de l'avion. L'augmentation des volumes produits a réduit les coûts et les rend abordables au grand public sous formes de tubes ou de plaques en carbone ou en fibre de verre. Ces derniers constituent le matériel principal pour la construction de drones multirotors.

Les drones à voilure fixe se doivent d'être aérodynamiques. Or les formes rondes, moulées en mousse, s'y prêtent bien. L'EPP, léger, résistant et facile à réparer, s'impose comme standard pour le carénage ou la coque de drones à ailes fixes de petites tailles.

DU LOISIR AUX APPLICATIONS PROFESSIONNELLES

L'aviation s'est toujours nourrie de modèles réduits pour tester des concepts, améliorer l'existant ou être utilisée à titre pédagogique. L'aéromodélisme a connu un boom dans les années 1970, avec l'apparition de radiocommandes proportionnelles en FM, mais l'absence de moyens de navigation automatique abordables (avant le GPS) faisait reposer le vol uniquement sur la dextérité du pilote. Le mode de propulsion dominant était le moteur thermique, peu fiable et générateur de vibrations et de salissures ; il nécessitait un entretien minutieux. Les châssis, souvent en bois, demandaient un long temps de montage et avaient une durée de vie courte. En outre, il n'y avait de toute façon pas grand-chose à attendre d'un appareil photo à bord tant que l'argentique prédominait. Les « drones civils » de l'époque étaient juste destinés au loisir.

L'arrivée de petits Caméscope, dans les années 1980, changent progressivement la donne. Quelques applications médias voient le jour, avec de gros hélicoptères radiocommandés, puis le film d'ouverture de la cérémonie du bicentenaire de la Révolution française, qui avait fait survoler les Champs-Élysées par un hélicoptère de la société belge Flying Cam équipé d'une caméra, marque les esprits. Il survole Paris à une dizaine de mètres de hauteur puis passe sous l'Arc de Triomphe – manœuvre très hasardeuse avec un hélicoptère habité.



Figure 1-21. Années 1980, un aéromodéliste passionné : l'auteur à l'âge de 12 ans avec un modèle Taxi de Graupner

En ce qui concerne les drones civils, un pays occupe à partir des années 1990 une place à part : le Japon. Ses agriculteurs les utilisent de façon massive pour l'épandage d'insecticides dans les petites parcelles de riz. La société Yamaha, avec son drone Rmax de 99 kg emportant 20 L de liquide, est leader sur ce marché avec un parc de plus de 3 000 unités, et en vend 300 par an. Ce succès est encouragé par le ministère de l'Agriculture japonais qui voit dans leur utilisation un moyen de pallier le manque de main-d'œuvre dans les campagnes.

L'émergence des technologies précitées et une baisse de leur coût font exploser le nombre de projets civils à partir des années 2005 (voir tableau ci-dessous). Sans dépasser le nombre d'applications militaires, il s'en rapproche avec un écart se réduisant de moitié.

Tableau 1-2. Projets portant sur des drones entre 2005 et 2013

ANNÉE	CIVIL/ COMMERCIAL	MILITAIRE	DUAL	RECHERCHE/ EXPÉRIMENTAL
2005	55	397	44	254
2006	47	413	77	248
2007	61	491	117	315
2008	115	578	242	347
2009	150	683	260	395
2010	171	631	283	367
2011	175	674	318	379
2012	217	548	353	260
2013	247	564	392	250
2014	408	600	502	222
Progression entre 2005 et 2014	× 7,4	× 1,5	× 11,4	stable

Source : UVS International

Autrefois soumis à autorisation préalable pour travail aérien, les drones bénéficient depuis 2012 d'un assouplissement de la réglementation dans la plupart des pays européens. Leurs usages explosent, alors que des flux d'investissements importants, souvent assortis d'entrées en Bourse, accélèrent la sortie de nouveaux produits. Comme pour l'informatique dans les années 1980, les constructeurs de drones occupent les médias. Leur maître incontesté est le chinois Franck Wang, âgé de 37 ans, fondateur de la marque DJI basée à Shenzhen, dont les ventes annuelles ont dépassé le milliard de dollars en 2015. Il est talonné par Henri Seydoux, le créateur de la société française Parrot, qui a levé 300 millions d'euros en novembre 2015. Aux États-Unis, la société 3DR, fondée par Chris Anderson, bénéficie de généreux investisseurs dont Richard Branson, le patron anglais de Virgin. La concurrence s'annonce rude, alors qu'entrent en lice de nombreuses nouvelles marques, notamment celles provenant de la Rivière des Perles chinoise (Yuneec, AEE, Hubsan). Toutes s'appuient sur les grands volumes de drones de loisir pour financer le lancement de systèmes plus techniques à usage professionnel. Les drones deviennent plus faciles à utiliser sans prérequis de pilotage, tandis que l'intégration et la miniaturisation des composants à bord s'accélèrent. Par ailleurs, les machines sont de plus en plus esthétiques.

ANATOMIE D'UN DRONE

« J'ai fait tous les calculs. Ils confirment l'opinion des spécialistes : notre idée est irréalisable. Il ne me reste plus qu'une chose à faire : la réaliser. »

Pierre-George Latécoère.

Trois, quatre, six rotors ou plus, des ailes volantes, battantes ou molles... les drones n'ont pas mis longtemps à s'affranchir des formes traditionnelles d'avions et d'hélicoptères. Le drone est souvent injustement réduit au véhicule seul, alors qu'il est constitué en fait d'un système avec des équipements au sol. C'est pourquoi les sigles anglais le désignant ont évolué d'*Unmanned Aerial Vehicle* (UAV), vers *Unmanned Aerial System* (UAS) puis plus récemment *Remotely Piloted Aircraft System* (RPAS) qui souligne que ce système a un pilote au sol.

Nous allons passer en revue les différentes formes de drones, puis nous en ouvrirons le châssis pour présenter ses différents composants.

Système de drone

Un système de drone est composé :

- du véhicule en lui-même ;
- d'une liaison GPS ;
- d'une liaison montante (les ordres de la radiocommande) ;
- d'une liaison descendante (retour vidéo de l'appareil photo et transmission des données de vol).

Des drones de toutes les formes

Avion ou hélicoptère, un drone est constitué de différents composants, dont des moteurs, de l'électronique, le système de transmission et la charge utile. Le début des drones civils rappelle la créativité des temps héroïques de l'aviation, quand l'expérimentation faisait foi. S'affranchissant de la contrainte de loger des personnes à bord, les inventeurs de drones n'ont pas manqué de fantaisie pour imaginer tailles et formes.

Comme pour leurs aînés grandeur nature, les drones se regroupent en deux familles : les voilures fixes (avions) et les voilures tournantes (hélicoptères) selon la nécessité de décoller et atterrir verticalement ou de parcourir de longues distances.

VOILURES FIXES

Commençons par le chouchou de l'aviation depuis un siècle : l'avion. Composés d'une aile et éventuellement d'un fuselage, d'une dérive et d'un empennage, les drones à voile fixe produisent la portance nécessaire au vol, par le vent relatif sur la voile (le vent relatif est généré par le mouvement en lui-même). Le contrôle du vol s'effectue par des gouvernes aérodynamiques. Il en existe deux sous-familles : les avions et les ailes volantes.

Avions

Les avions traditionnels sont composés d'une aile, d'un fuselage, d'une dérive et d'un empennage. Ce type de drones, notamment ceux ressemblant à des planeurs (ailes et fuselage fins), constituent la catégorie de ceux qui ont la plus longue endurance, 100 km et plus par vol, bien utile pour l'inspection de linéaires.



Figure 2-1. Le drone haute performance Delair-Tech DT26 de 3 m d'envergure. Avec un poids en ordre de vol de 10 kg, il peut parcourir 200 km.

L'empennage est une pièce fragile parce que mince. Il est le plus souvent en forme de T (donc surélevée) ou en V. Les drones de cette catégorie sont tous des avions à ailes hautes (placées au-dessus du fuselage), ce qui abaisse le centre de gravité donc accroît la stabilité. Autre avantage : à l'atterrissage, le fuselage (élément relativement robuste) touche le sol le premier, en épargnant les ailes, plus fragiles. Un avion traditionnel bénéficie d'une redondance de commandes : commande de profondeur, gouvernail, ailerons. Il peut continuer à voler si l'une d'entre elles venait à se bloquer. L'indisponibilité de la profondeur peut être compensée par une variation du régime du moteur : moteur plein gaz, il monte ; et au ralenti, il descend. L'indisponibilité d'un ou des ailerons peut être compensée par le gouvernail. Avoir le moteur à l'avant présente l'avantage de « souffler » les ailes et empennages, assurant donc des commandes efficaces et un peu de portance, même à basse vitesse. Mais c'est un élément fragile.



Figure 2-2. Le MAVinci Sirius est un avion radiocommandé, le Multiplex Mentor, transformé en drone par l'installation d'un autopilote et d'une charge utile. Il est utilisé pour de la cartographie. Rustique mais efficace !

Les avions adorent les lignes droites et seul un effort prolongé sur plusieurs gouvernes (ailerons, dérive et profondeur) peut les faire tourner et malgré tout avec un rayon relativement large. Cette caractéristique est un désavantage en cas de vent de travers ; il faut en effet un certain temps pour retrouver un plan de vol après s'en être écarté à cause d'une rafale. Suivre exactement les angles droits d'un réseau électrique n'est pas possible pour un avion : ce jeu est réservé aux ailes volantes qui y parviennent beaucoup mieux.

Ailes volantes

D'une forme très simple, l'aile volante se suffit à elle-même. Elle n'a pas besoin de dérive ou d'empennage, car son profil est autostable. Ses seules gouvernes, les éleveurs, un terme dérivé de l'anglais *elevator* (gouverne de profondeur) et d'aileron, un par aile, assurent à la fois :

- les virages, lorsqu'elles bougent en sens inverse ;
- la profondeur, lorsqu'elles bougent dans le même sens.



Figure 2-3. L'aile volante, vue de dessus, du constructeur français Lehmann Aviation. Notez la charge utile, une caméra GoPro 3 fixée sur l'aile.

Comme l'épaisseur d'une aile volante est rarement suffisante pour loger tous les composants et la charge utile, elle est souvent complétée par un fuselage court.

Les ailes volantes tendent à perdre de l'altitude dans les virages. Pour y remédier, les extrémités des ailes sont souvent complétées par des *wingtips*, petites ailes plates perpendiculaires.



Figure 2-4. Le Trimble X100 en vol, aile volante avec fuselage (notez les wingtips en bout d'aile)

L'absence de dérive et d'empennage rend l'aile volante facile à ranger dans une mallette plate. Sa maniabilité l'aide à suivre un plan de vol même en cas de rafales. Son épaisseur la rend robuste. Elle s'impose comme le design dominant de drones à usage de cartographie, quand une longue endurance n'est pas recherchée.

Tableau 2-1. Avantages et inconvénients des deux types de voilures fixes

TYPE	AVANTAGES	INCONVÉNIENTS
Avion	Longue endurance Redondance des gouvernes Protection et carénage de la charge utile	Moindre manœuvrabilité Encombrement Fragilité de la dérive et de l'empennage
Aile volante	Grande manœuvrabilité Faible encombrement Solidité	Moindre endurance Peu de place pour loger les composants et la charge utile Absence de gouvernes redondantes

VOILURES TOURNANTES

Les voilures tournantes produisent la portance en soufflant de l'air vers le bas grâce à leur(s) rotor(s). Il en existe deux types : les hélicoptères traditionnels à pas variable et les récents (et très populaires) multirotors à pas fixe.

Hélicoptères à pas variable

Avant l'apparition de la propulsion électrique, les voilures tournantes ont toujours été à rotor à pas variable. Le contrôle de la montée et de la descente s'effectue en changeant le pas des deux pales du rotor principal. Le contrôle du tangage et du roulis s'opère en modifiant le pas d'une seule des pales du rotor principal.

On distingue deux sous-familles : les hélicoptères traditionnels avec un rotor anticouple et ceux qui s'en passent grâce à deux rotors contrarotatifs.

Hélicoptères traditionnels muni d'un rotor anticouple

Un hélicoptère comporte un fuselage contenant le moteur, un rotor principal et un rotor de queue (le rotor anticouple).

Ce dernier a pour fonction de supprimer le couple de forces produit par le rotor principal. Pour comprendre le principe mécanique de ce couple de forces, imaginez de percer un trou avec une perceuse : immédiatement, la perceuse a envie de tourner dans le sens contraire de la mèche. Cette action-réaction vaut également pour l'hélicoptère : il se mettrait à tourner en toupie dans le sens inverse de rotation des pales lorsque celles-ci sont mises en mouvement. Le rotor anticouple annule cet effet et permet aussi de contrôler l'axe du lacet.



Figure 2-5. Le Copter 4 de Survey Copter est doté de deux moteurs thermiques de 29 cc (masse maximale : 30 kg, charge utile : 10 kg, autonomie : 1 h 30).

Les pales du rotor principal comme celles du rotor anticouple sont à pas variable. Le régime du moteur reste le même, quelle que soit la vitesse, puisque c'est le pas qui change. Le rotor principal et le moteur qui l'actionne tournent à des régimes différents : il est donc nécessaire d'y ajouter un réducteur débrayable. Le rotor comporte un système de plateaux capable de modifier le pas des deux hélices ou d'une seule hélice sur une portion déterminée de son cercle. Le mouvement du moteur est transmis au rotor anticouple par une courroie ou un arbre de transmission. Le rotor anticouple est lui-même à pas variable.

Arbre, courroies de transmission, pignons, systèmes de pas variable... Un hélicoptère est complexe et comprend un grand nombre de pièces en mouvement. Ces mouvements provoquent des vibrations, dont il faut protéger l'électronique. Une maintenance minutieuse s'impose : huilez, vérifiez le serrage des vis et le réglage des incidences, remplacez des pignons avant une usure excessive ou, pire, une rupture...

Le pilotage d'un hélicoptère est délicat. Le fuselage tend à se comporter comme une girouette en se mettant naturellement face au vent et le rotor anticouple perd son efficacité par vent de travers. En cas de crash, les pales deviennent un terrible projectile, et on ne peut pas installer un parachute de secours car le rotor en couperait les suspentes.

Les hélicoptères occupent une place marginale dans le parc de drones civils sauf pour les drones de grande taille (plus de 20 kg) et/ou de longue autonomie (plus d'une heure), pour la simple raison qu'alors ils peuvent être motorisés par un ou plusieurs moteurs thermiques.



Figure 2-6. Le Schiebel X100 (masse maximale : 200 kg, charge utile : 50 kg, autonomie : 6 h)

Hélicoptère à rotors contrarotatifs

Il s'agit d'une variante des hélicoptères traditionnels : deux rotors à pas variable tournent en sens inverse l'un de l'autre, sur le même axe, ce qui annule l'effet de couple. Ce type de design a l'avantage de se passer de fuselage, et donc d'être plus compact. Comme les hélicoptères traditionnels, il ne concerne que les grands drones et peut être mu par un moteur thermique. Sa place est marginale dans le parc existant.



Figure 2-7. L'Infotron IT180 à rotor contrarotatif (masse maximale : 19 kg, charge utile : 5 kg, autonomie : 1 h)

Voilures tournantes à pas fixe : les multicopters

Apparu au début des années 2000, un drone multicopter se stabilise et se dirige par la seule modulation de la vitesse de plusieurs rotors. Les moteurs et hélices à prise directe sont les seules pièces en mouvement. Ces drones nécessitent une modulation précise et synchronisée de la vitesse de rotation des rotors, prouesse dont seuls des moteurs électriques sont capables.

Son châssis est constitué d'un nombre variable de bras et d'un corps central, ce qui le fait ressembler à une araignée. Les bras supportent à leur extrémité les moteurs et hélices. Ce sont des tubes en matériau léger (fibre de carbone, fibre de verre ou aluminium). Ils peuvent être de section carrée ou ronde. Les tubes ronds nécessitent des fixations un peu plus lourdes, mais comme ils tolèrent un peu de jeu en cas de choc, ils rendent la structure plus résistante aux crashes.



Figure 2-8. Tubes en carbone stratifié pour bras de drone. En bas, le support « clamp » utilisé sur le bras à section ronde.

Le corps du châssis ressemble à une sorte de cage à plusieurs étages, composée de plaques en carbone et d'entretoises. Il abrite tous les composants vitaux : récepteur radio, émetteur télémetrique, émetteur vidéo, ordinateur de bord, capteurs, batterie(s) de vol, nacelle, charge utile, distributeur d'énergie, contrôleurs des moteurs (ESC, *Electric Speed Controller*). Le tout est assemblé comme un mécano, avec des vis et boulons. Ce corps est très modulaire, car on peut ajouter autant d'étages que nécessaire, sans grosse contrainte d'aérodynamisme, les multicopters ayant surtout vocation au vol stationnaire. Dans les drones haut de gamme, un dôme peut recouvrir le corps pour assurer une protection contre l'eau ou la poussière. Ils gagnent ainsi en esthétique et en aérodynamisme, mais au prix d'une légère surcharge.

Trois, quatre, six, huit moteurs... toutes les fantaisies sont permises car il suffit de changer une option du logiciel de l'autopilote pour gérer un nombre différent de moteurs ! Un nombre élevé de moteurs permet d'obtenir plus de portance, donc emporter une charge utile plus lourde, tout en utilisant des moteurs et hélices standard. Il augmente aussi, en théorie, la stabilité, tout comme la rigidité du châssis, la qualité du pilote automatique et l'inertie du drone. Le faible nombre de pièces en mouvement réduit le risque de défaillance tandis que la redondance des moteurs apporte une certaine sécurité : un drone hexacoptère ou octocoptère continue à voler même en cas de perte d'un moteur, car les autres moteurs compensent tant bien que mal.

L'autonomie de vol dépasse rarement 30 min pour les drones les plus professionnels et de l'ordre de 10 min dans la majorité des cas.

Quadrocoptères



Figure 2-9. Le quad Delta H, de 4 kg, du français Delta Drone

Les quadrocoptères (4 moteurs), quad en abrégé, sont les plus populaires en situation de loisirs, car leur maniabilité leur permet quelques acrobaties (bien sûr sans charge utile). Les plus gros sont aussi utilisés à des fins professionnelles.



Figure 2-10. Un quad semi-professionnel au look ravageur : le DJI Inspire. Son train d'atterrissage, solidaire des rotors, se remonte en vol pour dégager le champ de vision de la caméra.

Les FPV racers

Accélérations fulgurantes, pointes à 80 km/h, virages à angle droit, passage au ras du sol sous des portes (dites *airgates*), les courses de FPV racers sont spectaculaires. Elles mettent en scène des petits quads, souvent de moins de 500 grammes, pour 25 cm de diagonale. Ils offrent ainsi un bon rapport poids/puissance et sont particulièrement agiles. Très dépouillés, ils n'ont pour seules charges utiles qu'une caméra miniature, un émetteur vidéo et des LED arrière pour se faire remarquer. Les vols se font entièrement en immersion, le télépilote chaussant des lunettes vidéo qui transmettent en direct la vue de la caméra de bord. Compte tenu de la proximité aux obstacles et de la vitesse, les crashes sont fréquents ! Les courses

ont lieu dans des endroits aussi divers que des gymnases, des parkings souterrains ou des forêts. L'utilisation de la bande fréquence étroite de 5,8 MHz pour le retour vidéo limite le nombre de participants et oblige à une bonne coordination.



Figure 2-11. Le FPV racer Vortex de la marque Immersion RC

Les multicopters sont-ils condamnés à être dotés d'hélices à pas fixes ? Non, car des essais de pas variables ont été entrepris. En réduisant le nombre de leurs moteurs à un seul, ils ouvrent la porte à la motorisation thermique. Leur autonomie pourrait être ainsi doublée.



Figure 2-12. Quad à pas variable (expérimental) du constructeur japonais JR

Hexacoptères

Les hexacoptères (6 rotors et donc 6 bras) sont très populaires chez les photographes qui apprécient le compromis entre un encombrement raisonnable et une charge utile d'1 kg suffisante pour emporter la nouvelle génération d'appareil photo reflex plein format.



Figure 2-13. L'hexacoptère DJI S900. Sa charge utile est entièrement commandée depuis une tablette.

Octocoptères

Ce sont les « gros porteurs » professionnels pour des charges utiles allant jusqu'à 2 kg. Toutefois, leur encombrement peut rebuter. Ils rentrent rarement tout montés, prêts à voler, dans le coffre d'une voiture...



Figure 2-14. L'octocoptère Multirotor G4 de Service drone

Drones à moteurs coaxiaux

Comment rendre un drone plus puissant sans en augmenter la taille ? Simplement en superposant deux moteurs l'un sur l'autre. Cette astuce s'applique aux quads et aux modèles en « Y » (les drones à trois branches).



Figure 2-15. Drone en Y de construction amateur, customisé à la manière du tuning de voiture

Les moteurs installés de la sorte subissent une baisse de rendement d'environ 20 % par rapport à une installation classique, mais le gain de taille reste appréciable.



Figure 2-16. Le FOX-C8 de OnyxStar à 8 moteurs coaxiaux, équipé d'une caméra thermique

Formes en H

Les multicopters en « H » ont leurs moteurs installés le long de deux barres avec un écartement permettant de dégager le champ de vision de la charge utile de haut en bas et vers l'avant. Le corps est de forme rectangulaire. La charge utile étant placée à l'extrémité du corps, son changement ou modification implique un déplacement de la batterie de vol pour faire contrepoids.



Figure 2-17. Le Falcon 8 de Ascending Technologies (moins de 3 kg)

Le nombre de rotors et leur disposition ne change pas fondamentalement le pilotage, seulement l'aspect visuel. Il n'est pas évident en l'absence de queue et de fuselage d'en distinguer l'avant. C'est pourquoi les bras avant sont souvent de couleur vive ou comportent des LED qui ont l'avantage d'être visibles par faible luminosité et peuvent être programmés pour clignoter à l'atteinte d'un *way point* ou en cas d'épuisement des batteries.

En raison de leur simplicité de mise en œuvre et de leur coût modique, les drones multicopters représentent près de 80 % du parc existant de drones.

AUTRES DESIGNS : AILES SOUPLES, AILES BATTANTES, DRONES CONVERTIBLES

Sont présentés ici quelques-uns des designs les plus originaux de voilures : ils occupent chacun une niche sur la planète drones !

Ailes souples

Le drone à aile souple est un paramoteur équipé d'une nacelle où prend place la charge utile. En prenant de la vitesse, l'aile se gonfle et épouse un profil aérodynamique, qui lui assure une portance. Le pilotage est très simple : il suffit de tourner en tirant sur une suspente reliée à un bout d'aile, de monter en augmentant les gaz et de descendre en les coupant. Ce drone ne peut pas décrocher : en cas de panne moteur, il redescend comme un parapente. La vitesse lente, constante quel que soit le régime du moteur, est problématique en cas de vent ou d'ascendances.



Figure 2-18. Parapente ou drone ?

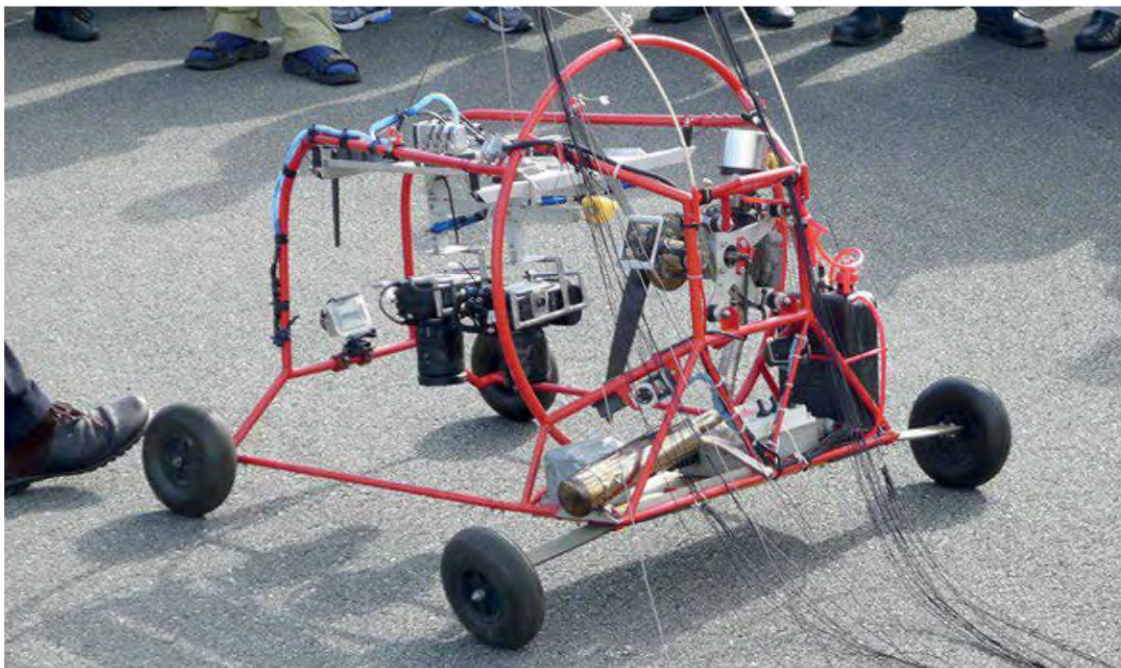


Figure 2-19. Nacelle de drone-parapente

Ce type de drone cherche sa place pour des missions nécessitant un vol quasi stationnaire : portage de relais de transmission, observation... Grâce à une grande capacité d'emport, et des décollages courts, il peut être utilisé pour transporter des colis humanitaires.

Ailes battantes

Idée saugrenue que de revenir aux ailes battantes, à l'instar du jouet à moteur en caoutchouc de notre enfance ! Toutefois, ce mode de propulsion peut être indispensable quand on veut être confondu avec un oiseau pour :

- lutter contre le risque aviaire aux abords des aéroports, en ressemblant à un oiseau de proie : c'est un épouvantail volant ;
- décoller et atterrir verticalement sans risque de blesser avec des rotors ;
- effectuer une surveillance discrète.



Figure 2-20. Faucon à ailes battantes du hollandais Clear Flight Solutions

Drones convertibles

Décoller et atterrir verticalement comme un hélicoptère et voler vite et loin comme un avion : voilà le défi réussi par le Boeing V22 Osprey, et aujourd'hui à l'essai pour les drones. L'idée est d'ouvrir de nouvelles voies d'utilisation, notamment maritimes, qui nécessitent de décoller depuis le pont d'un bateau. La solution la plus simple pour y arriver est de doter un quadrimoteur d'ailes et d'un ou plusieurs moteurs auxiliaires horizontaux. Dans cette configuration, sitôt l'altitude cible atteinte, les moteurs du quad sont coupés et les moteurs horizontaux mis en route, tandis que l'aile assure la portance. Un système qui souffre, en croisière, de la traînée et du poids des moteurs du quad, inutile dans cette phase du vol.



Figure 2-21. Mi-multirotor, mi-aile volante, le drone convertible FoXy Pro du nantais Hélicéo

Une solution plus performante, mais plus complexe, est de rendre les moteurs basculables, en position verticale pour décoller et en position horizontale en croisière. La marque de loisir Graupner a réussi ce pari avec son drone X44. Certes, sa taille réduite (86 cm d'envergure) modère les contraintes mécaniques du basculement. À quand une application professionnelle ? Sans doute quand seront ajoutées des hélices à pas variables, car le meilleur rendement est obtenu en positions verticale ou horizontale avec des pas différents.



Figure 2-22. Le drone de loisir convertible Graupner X44, à moteurs basculants

Tableau 2-2. Comparatif des drones à voilures tournantes

TYPE	AVANTAGES	INCONVÉNIENTS
Hélicoptère traditionnel	Performance Autorotation possible Manœuvrabilité Endurance (quand motorisation thermique)	Complexité Taille Danger des rotors
Multirotor	Simplicité et coût réduit Possibilité d'installer un parachute	Faible autonomie car motorisation électrique
Multirotor à pas variable	Centralisation du bloc moteur, qui permet une motorisation thermique de grande endurance	Complexité
Hélicoptère à rotor contrarotatif	Les mêmes que l'hélicoptère traditionnel, avec en plus un encombrement moindre	Idem aux hélicoptères traditionnels
Aile battante	Pas de danger d'hélice Est confondu avec un oiseau	Fragilité Complexité Faible charge utile
Convertible	Performance théorique d'endurance et de décollage vertical	Complexité technique. Transition délicate entre vols vertical et horizontal

POURQUOI CETTE DIVERSITÉ DE FORMES ?

Comme vous avez pu le constater, il existe une grande diversité de drones. Pourquoi autant de formes différentes ? Simplement parce que les drones essayent de répondre au mieux à des besoins spécifiques, tout en optimisant des performances d'endurance et de charge utiles encore modestes ou insuffisantes.

S'accommoder du terrain de décollage et du plan de vol

Si le terrain comporte des obstacles, le drone doit décoller et atterrir verticalement, donc être pourvu d'une voilure tournante. En revanche, si le terrain est grand et dégagé, une voilure fixe peut suffire.

La distance à parcourir, l'altitude, la vitesse et les limitations météo, bref, tous les impératifs de la mission, nécessitent des formes aérodynamiques particulières. Une voilure fixe possède une endurance triple de celle d'une voilure tournante et elle se montre plus rapide, mais elle ne peut pas porter une charge lourde ou encombrante car elle se doit d'être aérodynamique. Un appareil multirotor dont la vocation principale est le vol stationnaire ne présente pas cette contrainte.

Supporter la charge utile

La charge utile va directement influencer la taille du drone. Le drone doit en supporter le poids, l'encombrement, la fragilité voire la consommation électrique. Elle ne dépassera pas 20 % du poids total en ordre de vol. Par exemple, s'il s'agit d'effectuer des prises de vue avec un petit appareil photo compact, un quad de moins de 2 kg fait l'affaire. S'il faut réaliser des prises de vue haute définition avec un reflex grand format du type Canon 5D, on devra opter pour un appareil multirotor de 7 à 8 kg.

Le drone doit préserver le champ de vision de la charge utile dans la direction qui importe pour la mission (verticale, horizontale ou oblique). Par exemple, un appareil photo sur un avion peut être placé dans le nez ou sous le fuselage. Sur une aile volante, plus épaisse, il peut être placé dans l'épaisseur de l'aile. Les constructeurs vont rivaliser d'ingéniosité pour que le train d'atterrissage ne vienne pas obstruer la vue de l'appareil photo. Le constructeur DJI le rend escamotable sur son modèle S1000, tandis que Freefly le solidarise à la nacelle 3 axes. Une solution plus radicale, pour les voilures fixes, est de le supprimer, afin de pouvoir atterrir sur le ventre.

Faciliter l'entretien

Les avions grandeur nature ont un potentiel en nombre d'heures de vol. Les drones, quant à eux, sont exploités sur des terrains souvent impropres à l'aéronautique ; de plus, ils sont sensibles aux rafales et leurs télépilotes ou autopilotes ne sont peut-être pas des adeptes des atterrissages en douceur... Au cours des opérations, il est fréquent qu'une hélice touche le sol ou qu'un *wingtips* ou une antenne se brise. Le drone doit avoir un design qui facilite la maintenance et donc qui garantit une disponibilité.

Pour certains petits drones (Gatewing, Lehmann Aviation) la pièce d'usure est l'aile elle-même qui devient du simple matériel consommable. Les parties nobles (autopilote, capteurs, batterie, charges utiles) sont récupérables et peuvent être remontées facilement sur un nouveau châssis. Le tout doit être facile à nettoyer car il n'est pas question de redécoller en emportant de la boue ou, pire, que des capteurs soient obstrués.

Être facilement transporté et mis en œuvre

Un drone passera la plupart de son existence au sol et dans les transports. Un multirotor, surtout un grand octocoptère, peut être encombrant (1 m et plus d'envergure pour 40 cm de haut). Certains drones sont optimisés pour le transport : bras de multiroteurs repliables ou détachables, ailes démontables.



Figure 2-23. Le senseFly eBee, doté d'ailes démontables

Minimiser les risques pour l'environnement

Le risque de crash existe, avec potentiellement de sérieux dommages pour les personnes et les biens. Plus la cellule est légère ou réalisée en matériaux absorbant les chocs et plus les conséquences d'un crash sont faibles pour l'environnement. De plus en plus de drones multirotors ont des hélices carénées pour minimiser les risques de bris d'hélices.



Figure 2-24. Carénage des hélices (pour la sécurité) d'un Aibotix X6

Répondre aux contraintes financières

Un design optimisé est sans doute le fruit d'un long développement, nécessitant du personnel qualifié et des logiciels sophistiqués. La performance et le sur-mesure se payent très cher. À l'inverse, un design rustique incorporant des pièces sur étagère et des matériaux moins nobles sera certes moins performant et plus encombrant, mais coûtera beaucoup moins cher à l'achat et à l'utilisation.

Compte tenu de performances encore limitées, les drones sont dimensionnés au plus juste pour répondre aux besoins spécifiques de leurs clients. Le drone universel n'est pas pour tout de suite, avant qu'un design dominant n'émerge...

Principaux composants du véhicule

Ouvrons maintenant le châssis d'un drone pour en découvrir les composants. Parmi les systèmes de bord, l'autopilote et ses capteurs occupent une place centrale, suivis de la motorisation, des actionneurs et de la transmission.

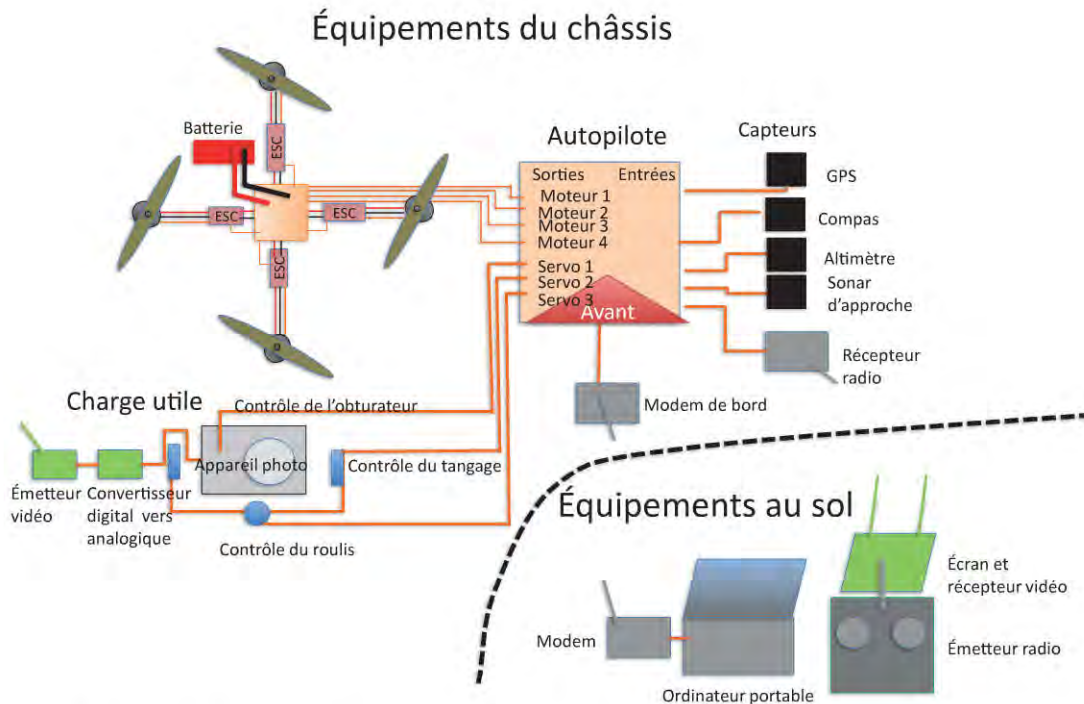


Figure 2-25. Schéma fonctionnel d'un drone quadrirotor

AUTOPILOTE

L'autopilote constitue le centre nerveux du drone, dont il assure a minima la stabilité (dans ce cas, il est simplement appelé « contrôleur »), voire la navigation. Sans autopilote, une voilure fixe redeviendrait un simple avion radiocommandé et un drone multirotor serait incontrôlable, même pour les pilotes les plus chevronnés. L'autopilote, qui tient aujourd'hui dans le creux de la main, résume à lui seul les progrès de miniaturisation et de fiabilité de la robotique de ces vingt dernières années.

L'autopilote se présente sous la forme d'un ou de deux circuits imprimés, chacun occupant l'une des fonctions citées précédemment. Il contient le processeur principal, des capteurs, de la mémoire et de nombreuses interfaces, dont le module GPS nécessaire à la navigation. Situé entre le récepteur radio et les actionneurs, il est solidement fixé au châssis, le plus près possible du centre de gravité.

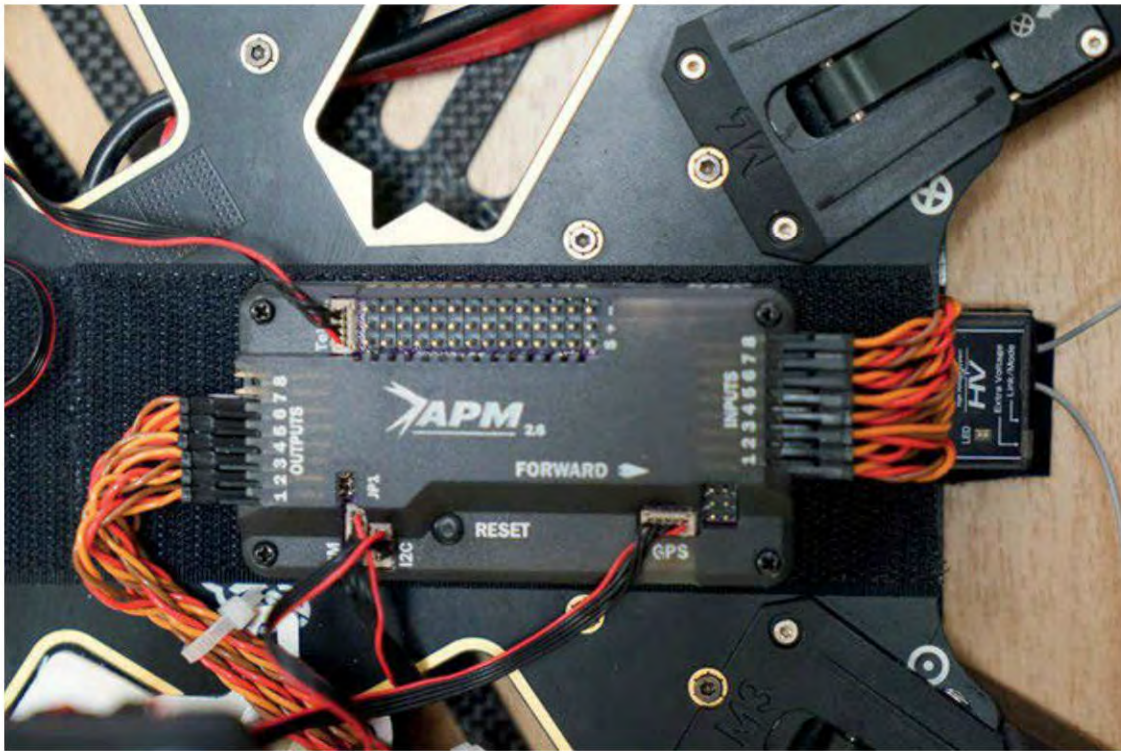


Figure 2-26. L'autopilote open source APM 2.6 de 3DR. À gauche, les sorties vers les moteurs ; à droite, les entrées en provenance du récepteur.

Il est programmé avec un logiciel contenant toutes les informations nécessaires à la gestion du vol.

Capteurs de vol

Pour stabiliser le drone, des capteurs reçoivent toutes les sensations d'accélération, de vitesse, d'altitude, d'inclinaison qu'aurait un pilote à bord, et les traduisent en courant électrique envoyé au calculateur de bord. Les progrès de la microélectronique ont réduit leur taille à quelques millimètres pour certains. Les capteurs indispensables au vol sont :

- le capteur de pression qui gère le maintien d'altitude ou plus précisément pour les drones, une hauteur par rapport au point de départ ; il fonctionne sur le principe que la pression atmosphérique diminue, lorsque l'altitude augmente, de l'ordre d' $1/1\ 000^e$ tous les 30 m ;
- l'accéléromètre qui mesure l'inclinaison en temps réel du drone et gère aussi le contrôle de la hauteur ;
- les gyroscopes, au nombre de trois (un par axe), mesurent chacun la vitesse de rotation angulaire sur un axe ; ils sont nécessaires pour déterminer la position dans les airs et pour compenser les perturbations extérieures ; un gyroscope est sensible à la température, il est donc calibré automatiquement à chaque mise en route du système ;
- le compas digital mesure l'intensité du champ magnétique terrestre le long de trois axes orthogonaux ; il fournit une direction compensée de l'inclinaison entre le Nord magnétique et le Nord géographique.

Autres capteurs et modules optionnels

- Le capteur de vitesse air (uniquement pour les avions) mesure la vitesse par rapport à l'air et non par rapport au sol. Il fonctionne sur le principe de la différence entre une pression statique et la pression dynamique que provoque l'entrée d'air dans un petit tube, appelé « tube de Pitot ». Ce tube doit être placé face au vent relatif, par exemple sur le bord d'attaque d'une aile ou à l'avant du fuselage. Comme pour les avions grandeur nature, la check-list doit comporter la vérification de la non-obstruction du tube, sous peine de données erronées et crash pendant le vol.

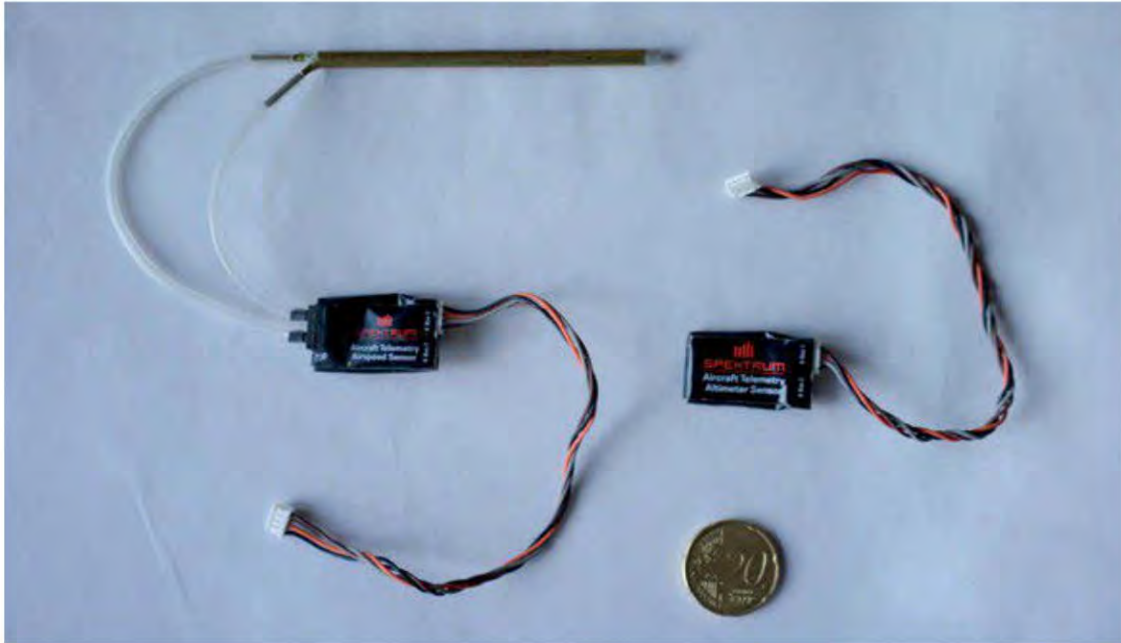


Figure 2-27. À gauche, capteur de vitesse air relié à un tube de Pitot en cuivre ; à droite, capteur d'altimétrie. Tous deux sont de la taille d'un morceau de sucre.

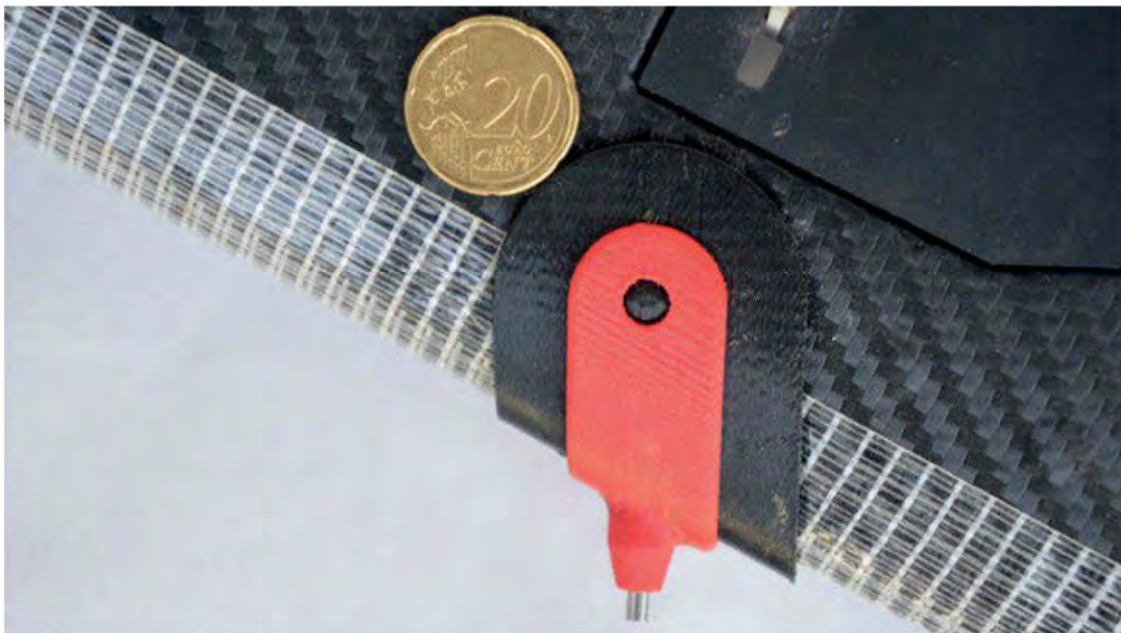


Figure 2-28. Tube de Pitot sur le bord d'attaque d'un Trimble X100

- Le voltmètre et l'ampèremètre mesurent l'état de la batterie de vol et la quantité d'énergie consommée.
- Le module GPS est un élément indispensable au vol automatique et à la navigation car il permet la géolocalisation de l'aéronef en longitude, latitude et aussi altitude. La précision est au mieux de 10 m et dépend de la qualité du signal et du nombre de satellites. Le GPS permet aussi de calculer une route vraie et une vitesse. Le capteur GPS doit avoir une vue dégagée du ciel, donc être fixé sur un point élevé du drone. Pour le protéger des interférences des autres instruments de bord, il est protégé par des boucliers (MikroKopter), ou monté sur une tige (3DR et DJI).

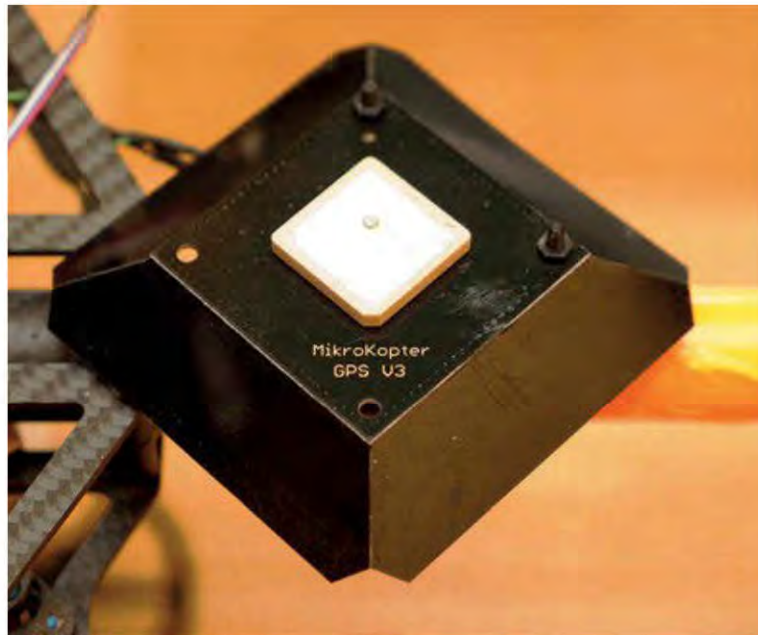


Figure 2-29. Module GPS d'un drone MikroKopter V3. Notez les boucliers noirs.



Figure 2-30. Antenne GPS 3DR



Figure 2-31. Antenne GPS DJI

- Le capteur de mesure de distance (sonar ou laser) est comparable au radar de recul pour les voitures : il émet des ultrasons dont l'écho permet de mesurer à quelques centimètres près une distance ; il ne fonctionne généralement qu'à partir d'une distance réduite (environ 10 m).
- Le capteur vidéo aide à la stabilisation de l'aéronef et non à la prise de vue (qui, lui, relève de la charge utile). Le capteur détecte des déplacements par rapport aux images vidéo : par exemple, le drone de loisir Parrot AR Drone en est pourvu.

Calculateur

Le calculateur, ou processeur, reçoit les valeurs des capteurs, les compare avec une valeur désirée, puis émet des ordres de pilotage.

Mémoire

En lecture, la mémoire contient la programmation du vol, les réglages de régulation et éventuellement des critères de décision.

En écriture, elle enregistre tous les paramètres de vol, souvent sur une carte micro SD : c'est la boîte noire du drone. Certains de ses paramètres peuvent être envoyés en continu à la station au sol pour y être enregistrés. Cet équipement est très utile pour comprendre les causes d'un crash, même quand le drone n'est pas retrouvé.

ACTIONNEURS

Les actionneurs traduisent les ordres de l'autopilote en actions sur des gouvernes des voilures fixes ou la nacelle de la charge utile.



Figure 2-32. Gouverne d'ailerons : on devine la forme rectangulaire d'un servo intégré dans l'aile.

Ces servomoteurs électriques existent en toutes tailles : du demi-cube de sucre à celle d'un savon. Ils sont classés selon leur vitesse de rotation (par exemple 0,13 s pour 60° pour un servo rapide) et par leur puissance exprimée en kilogrammes (par exemple 4 kg pour un servo standard), qui correspond à l'effort mécanique demandé. Ils sont constamment sollicités par l'autopilote, notamment pour la stabilisation du drone ou de la charge utile. De fait, cet élément fragile doit être remplacé fréquemment. Lorsqu'ils travaillent au maximum de leur capacité, les servo ont une consommation électrique forte qui risque de faire chuter la tension des circuits de bord, jusqu'à provoquer une panne et une descente rapide. Une solution consiste à les alimenter séparément de l'autopilote.

SYSTÈME DE LIAISON

Élément indispensable pour accomplir la mission, le drone est équipé de liaisons bidirectionnelles (montantes et descendantes).

Récepteur radio

La liaison de contrôle est celle qui reçoit du sol des ordres du type « tourne à gauche » ou « fais pivoter la caméra ». Elle se matérialise, sur le drone, par un récepteur apparié avec l'émetteur, donc insensible aux éventuelles interférences d'autres émetteurs.

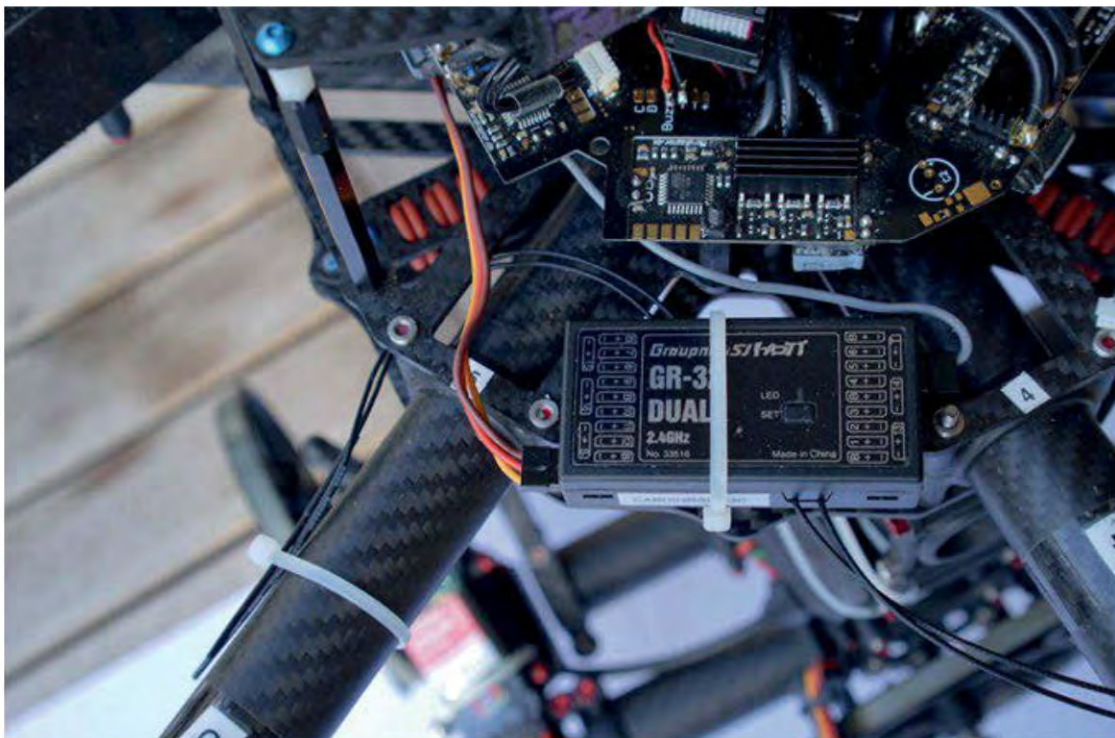


Figure 2-33. Récepteur radio Graupner GR32 : grâce au multiplexage de l'autopilote, les 16 voies passent par le seul fil jaune (le fil gris correspond à la télémétrie).

Modem

Le modem de bord est un émetteur/récepteur Wi-Fi qui transmet la position géographique du drone et les mesures des capteurs à un autre modem au sol relié à un ordinateur. Il peut aussi recevoir des ordres du sol.

Émetteur vidéo

Pour aider à cadrer photos et vidéos, le drone a une liaison vidéo descendante : la source du signal provient, de préférence, directement de l'appareil photo, de sorte que le télépilote au sol a accès aux mêmes informations en incrustation d'image que s'il se trouvait derrière le boîtier en vol. Le signal est généralement pris de la prise HDMI qu'ont les appareils photo moyen ou haut de gamme et transmis à un émetteur vidéo. Lorsque le lien est digital, l'image peut disparaître de l'écran vidéo au sol brutalement en cas d'éloignement du drone et mettre un certain temps à réapparaître. Le convertir en analogique avant l'émission permet de rendre la dégradation progressive. La puissance maximale d'émission vidéo autorisée sur un drone en France est de 25 mW. Avec ce niveau de puissance, il ne faut pas espérer une portée supérieure à 300 m, sans antennes particulières. Sont arrivés sur le marché (à mi-2014) des amplificateurs digitaux d'1 km de portée, telles que le DJI Light.

CHAÎNE DE MOTORISATION

La chaîne de motorisation comprend la batterie de vol, la boîte de puissance, les contrôleurs, les moteurs et les hélices. Un drone hexaoptère de 4 kg en montée peut consommer 800 W et a donc besoin d'une alimentation fiable.

Batterie de vol

La motorisation est la principale source de consommation d'énergie. Elle dicte donc la tension et la capacité de la batterie de vol. Si des circuits de tension différente cohabitent à bord, il est toujours plus léger et pratique d'alimenter l'ensemble par la seule batterie de vol, en ajoutant éventuellement des transformateurs, plutôt que d'utiliser d'autres batteries. La batterie doit être de la plus forte densité énergétique possible et accepter un taux de décharge important, qualité qui font se distinguer les batteries au lithium polymère. Cette performance est perçue comme un défaut par les compagnies aériennes qui limitent, voire interdisent leur embarquement à bord d'avions de ligne, en raison des risques d'incendie. Se renseigner auprès de votre compagnie sous peine de devoir décoller sans vos batteries ! Ce type de batterie est disponible principalement sous forme rectangulaire.



Figure 2-34. Quelques batteries standards embarquées dans des drones. La capacité, la tension et le coefficient de décharge sont indiqués sur leur boîtier. Les prises (jaunes, rouges ou noires) diffèrent selon la taille de la batterie.



Figure 2-35. Batterie sur mesure utilisée sur un Microdrones

Les batteries sont classées selon :

- leur tension qui est toujours un multiple de 4 V (tension d'une cellule) : ainsi, une batterie de 12 V comporte donc 3 cellules ;
- leur capacité (en milliampère/heure noté mAh) ;
- le coefficient de décharge qui indique le taux maximal de charge ou décharge sans dégradation de la batterie : par exemple, 1 C signifie que l'ensemble de l'énergie stockée peut être déchargée en 1 h (intensité faible). Pour un multirotor, compte tenu des pics de consommation, un minimum de 20 C est nécessaire : cela correspond à une décharge en 3 min.

Élément important de performance et de sécurité, les batteries nouvellement développées pour des drones spécifiques reçoivent des capteurs et deviennent « intelligentes ». Leur comportement tout au long des cycles de charge/décharge est enregistré.

Contrôleurs brushless

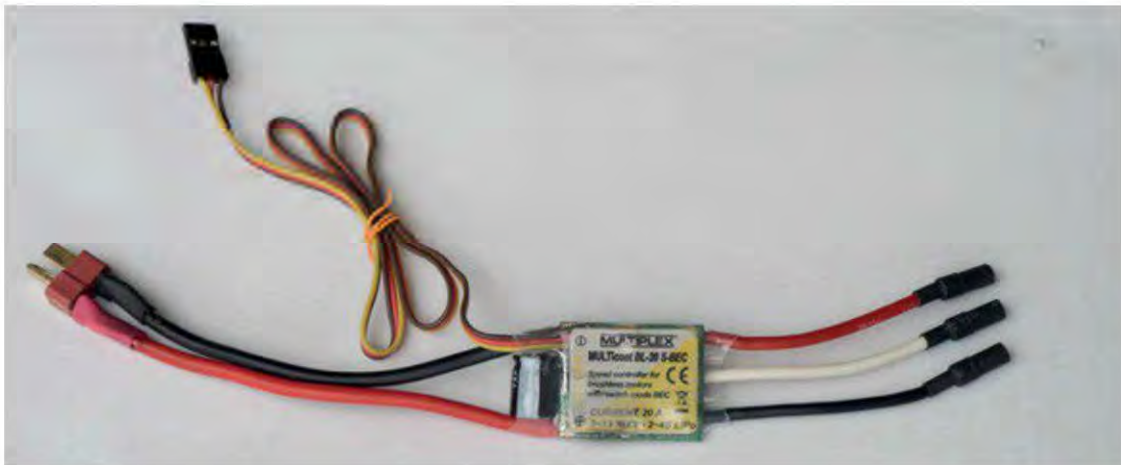


Figure 2-36. Contrôleur brushless standard. La prise rouge à gauche est connectée à la batterie de vol ; les trois fils à droite partent vers le moteur, en courant alternatif ; la prise de servo en haut à gauche est branchée sur l'autopilote, fournissant également un courant en 5 V de faible ampérage.

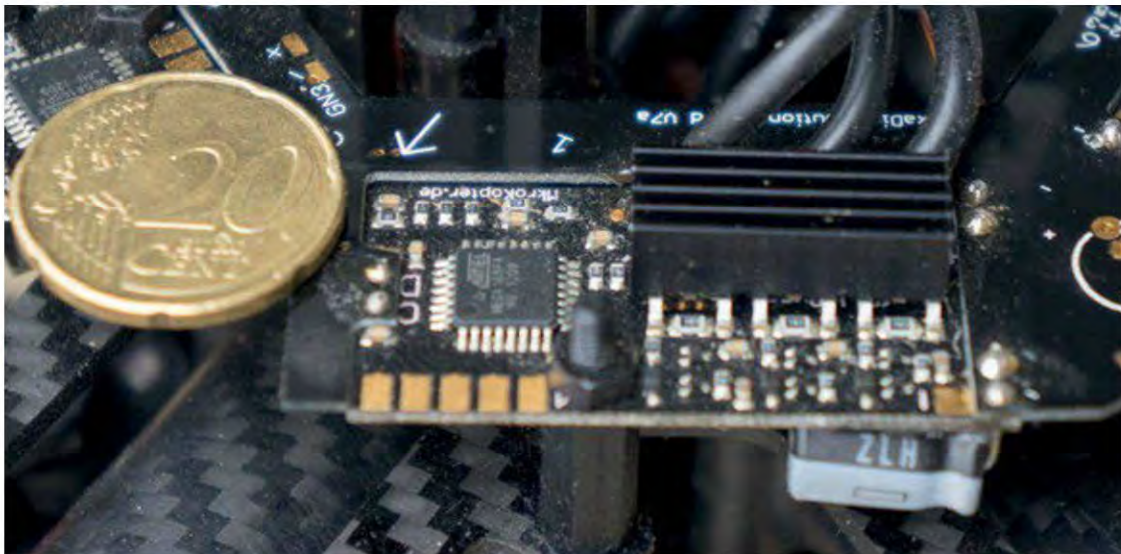


Figure 2-37. Un contrôleur brushless MikroKopter. Ces contrôleurs spécifiques sont montés sur une plaque de circuits intégrés.

Ils transforment le courant continu de la batterie de vol en courant alternatif en impulsions précises pour faire fonctionner les moteurs brushless. Les contrôleurs doivent être dimensionnés pour supporter l'intensité du courant. Cette intensité dépend du moteur, de la taille et du pas de l'hélice. Ils chauffent. Les contrôleurs du commerce disposent aussi d'une sortie en 5 V, à faible ampérage, ce qui suffit pour alimenter un récepteur et trois ou quatre petits servos.

Chez DJI, les contrôleurs brushless se trouvent sous le flux d'air des moteurs.



Figure 2-38. Contrôleur brushless d'un DJI S800 situé en extrémité du bras, sous le moteur

Moteurs brushless

Sans eux, il n'y aurait pas de drones multirotors. Ils n'utilisent pas de charbons pour distribuer l'énergie au rotor. Les aimants tournent, et les bobines sont statiques, ce qui provoque moins de friction et de pièce d'usure, à part bien sûr l'arbre.



Figure 2-39. Moteurs à cage tournante (à gauche) et fixe (à droite)

Les moteurs brushless ont un rendement proche de 90 % et ne demandent pas d'entretien. Ils peuvent même fonctionner sous l'eau. Il en existe deux sortes : les moteurs à cage tournante, les plus répandus car offrant un bon couple, et les moteurs à cage fixe qui peuvent être noyés dans un fuselage.

Classification des moteurs brushless

Les moteurs brushless sont répertoriés en fonction de leur KV, qui correspond au nombre de tours effectués par minute et par volt. Considérons par exemple un moteur standard, comportant 4 cellules de batterie de 3,7 V chacune. Si son KV vaut 900, alors il effectue par minute :

$14,8 \times 900 = 13\,300$ tours, soit 220 tours/s.

Hélices

Les hélices des drones sont les pneus des voitures, des pièces d'usure à surveiller. Les multicopters fonctionnent avec des paires d'hélices à pas normal (horaire) et à pas inversé (antihoraire). Il faut respecter le type de pas, sous peine de voir le multicopter se retourner au décollage.

Les matériaux utilisés sont par ordre croissant de prix et de performance : le nylon (plastique), le bois (généralement le hêtre), et le carbone. Les hélices en bois ont le mérite d'être moins dangereuses en cas de choc. Le métal, réservé à l'aviation générale, est utilisé pour les drones de grande taille (comme Infotron). L'hélice peut être fixe ou repliable pour prévenir la casse. Il est pratique de pouvoir replier ces éléments fragiles lors du transport, ce qui offre un gain de place appréciable.



Figure 2-40. À gauche, hélices horaires en carbone (noires), hêtre (beiges) ou nylon (grises) ; à droite, celles tournant en sens inverse (le pas est donc inversé).

Classification des hélices

Elles sont classées en fonction du produit taille \times pas, où la taille est la longueur en pouces de l'hélice, et le pas est la distance horizontale parcourue en pouces par l'hélice à chaque tour. Par exemple :

- 13,5" \times 4" pour un hexacoptère de 4 kg ;
- 10" \times 4,7" pour un quad d'1 kg.

Les hélices peuvent grièvement blesser, même à bas régime. Il faut toujours les retirer pour un essai de rotation des moteurs après un changement de logiciel ou d'électronique et se dire que, dès que la batterie est branchée, il y a un risque qu'un moteur démarre inopinément.



Figure 2-41. Hélice propulsive du Trimble X100. Elle est repliable pour prévenir les dommages à l'atterrissage.

COMMENT RÉPARTIR LES COMPOSANTS DANS UN DRONE ?

Les composants de bord doivent être placés judicieusement, car ils peuvent se perturber les uns les autres. Nombre d'entre eux produisent de la chaleur : des ouvertures suffisantes doivent assurer une bonne ventilation. Le cas échéant, les éléments chauds, tels qu'un émetteur vidéo, peuvent être installés directement sous le flux d'air des hélices, qui constitue un excellent ventilateur.

Les pièces en mouvement (hélices et moteurs), engendrent des vibrations auxquelles des capteurs tels que l'accéléromètre, le compas ou le sonar sont sensibles. Ces perturbations doivent être traitées à la source, par exemple en équilibrant les hélices ; sinon, il faut protéger les capteurs en les montant sur des caoutchoucs, des ressorts ou de la mousse absorbante. Les circuits électriques, surtout ceux à forte intensité et en courant continu, provoquent un champ magnétique auquel le compas est sensible. Il faut donc le placer le plus loin possible.



Figure 2-42. Vue à la caméra thermique d'un drone après un vol. La batterie en haut est la zone la plus chaude.

Charge utile

Pour donner une image, la charge utile correspond au passager à transporter : matériel électronique, appareil photo, caméra vidéo, capteurs thermiques, etc. Elle est directement liée au type de mission. Des expériences ont lieu parfois avec des caméras thermiques, des Lidar (une sorte de radar), des sondes de radiation, etc., car tout peut être transporté dans un drone, à condition que ce soit petit, léger et bien protégé.

Appareils comptés en charge utile



Figure 2-43. Charges utiles : appareils photo et Caméscope

- Appareil photo Ricoh GR (en haut à gauche) ;
- Caméscope Sony CX730 (au milieu) ;
- Appareil photo plein format A7R (à droite). Notez le fil de servo relié à une LED pour le déclenchement à distance ;
- GoPro (en bas à gauche).

Les charges utiles de dernière génération intègrent le capteur et les moyens de stabilisation en une boule compacte.



Figure 2-44. La boule gyrostabilisée Yuneec

INTÉGRATION DANS UNE VOILURE FIXE

Dans un avion ou une aile volante, l'appareil photo et souvent dissimulé dans le fuselage : seule une ouverture vers le bas permet d'en soupçonner la présence.



Figure 2-45. À gauche, le senseFly eBee équipé d'un capteur proche infrarouge destiné à l'agriculture et développé par Air Innov. À droite, le Trimble X100 et l'objectif du Ricoh GRD bien visible.

INTÉGRATION DANS UNE VOILURE TOURNANTE

Les voilures tournantes peuvent porter plus et ont moins de contraintes aérodynamiques que les voilures fixes. Elles peuvent donc embarquer une nacelle qui assure le contrôle et la stabilisation de la charge utile. Le télépilote la contrôle sur deux ou trois de ses axes en actionnant des leviers ou molettes de la télécommande, tandis que les mouvements du drone sont automatiquement contrebalancés grâce aux informations venant de l'autopilote. Les actionneurs de la nacelle peuvent être des servo classiques éventuellement démultipliés par une courroie en caoutchouc afin de rendre les mouvements plus fluides. Les moteurs brushless pour nacelle, apparus sur le marché en 2012, garantissent une stabilisation plus fine et sans à-coups, au prix d'une légère surcharge.

Idéalement, la charge utile est placée sur le centre de gravité du drone de sorte que son changement ne provoque pas de déséquilibre. Un drone multirotor a plus de tolérance à un déplacement de centre de gravité qu'une voilure fixe, car ses rotors peuvent compenser.

Pour les drones multiroteurs, la charge utile est presque toujours placée sur une nacelle au centre, sous les hélices. Pour certaines applications qui nécessitent une vision vers le haut, comme l'inspection du tablier d'un pont, elle peut être placée en haut, au-dessus des hélices. Parrot a innové en 2014 avec le BeBop, le premier drone dont la stabilisation de l'image est réalisée électroniquement depuis une optique fisheye, fixe, ce qui fait gagner en poids et en volume, au prix sans doute d'un peu de latence.



Figure 2-46. Une nacelle à moteurs brushless sur les côtés et au centre

Équipements au sol



Figure 2-47. Émetteur « boîtier », pouces au-dessus : compact mais peu confortable.

Le drone ne saurait accomplir sa mission sans ses équipements au sol de contrôle, de réception des données de vol ou de la charge utile. Certains drones ont aussi un dispositif de lancement et de récupération.

ÉQUIPEMENTS DE CONTRÔLE

Les équipements de contrôle sont regroupés dans la télécommande, éventuellement complétée par un ordinateur et un modem.

Pour un vol manuel de précision, une télécommande avec manettes et interrupteurs reste indispensable. Il en existe deux sortes : les émetteurs « boîtiers » et les émetteurs « pupitres ».

Les télécommandes sont programmables. Elles enregistrent des paramètres de contrôle propres à chaque drone (inversion et longueur de la course de servo, sélection des interrupteurs, trim). Une sécurité existe pour éviter d'utiliser les paramètres d'un drone sur un autre drone.



Figure 2-48. Émetteur « pupitre », plus encombrant mais plus confortable pour une activité professionnelle. Notez les écrans de télémétrie et l'écran vidéo au-dessus.

Une télécommande se divise en trois parties :

- 2 manettes avec retour au neutre par ressort ;
- des boutons pressoirs, des interrupteurs à 2 ou 3 positions, des molettes : ils servent à contrôler la charge utile ou changer de mode de vol ;
- des écrans de contrôle : ils donnent des informations sur l'état de la télécommande et aussi des informations sur les capteurs à bord par liaison descendante. Les télécommandes sur étagère avec liens télémétriques sont apparues en 2010.

Il faut un certain nombre de fonctions, appelées « voies », pour réaliser une mission :

- 4 voies au minimum pour contrôler le drone sur ses 4 axes avec les manettes ;
- 2 voies au minimum pour les modes de pilotage basiques : Altitude Hold, Position Hold, normal, vol automatique ; ces modes sont commandés par des interrupteurs à 2 ou 3 positions ;

- 2 voies au minimum pour contrôler la charge utile : déclencher l'obturateur et contrôler l'axe vertical.

Cela fait donc un total de 8 voies au minimum. Un nombre supérieur apportera plus de confort et de sécurité pour une utilisation professionnelle :

- jusqu'à 4 voies pour des modes de vols supplémentaires tels que le décollage automatique et atterrissage automatique, le maintien de la direction ;
- 1 ou 2 voies pour zoomer et choisir entre photographier ou filmer. Les cinéastes voudront en plus un contrôle de la caméra sur ces 3 axes, indépendant du contrôle du vol. Pour cela, il faut 2 voies supplémentaires.

Certains émetteurs haut de gamme proposent 18 voies.

Avec autant de manettes et boutons, gérer une mission devient complexe. Le drone peut échapper à l'attention du télépilote le temps d'un réglage ou de la recherche d'une information sur l'écran alors qu'un mauvais bouton peut être pressé. Heureusement, les émetteurs les plus récents ont une synthèse vocale qui rappelle les modes de vols engagés et lit les paramètres du vol. Une bonne pratique est d'étiqueter les fonctions associées aux boutons pour les retrouver facilement.

Descriptif d'une radio MC32

- Déclenchement de l'appareil photo (trigger)
- Décollage/atterrissage automatique (en bas à gauche)
- Contrôle d'altitude (en bas, au centre)
- Maintien de la position et retour au point de départ par des interrupteurs à levier (en bas, à droite).



Figure 2-49. Radio MC32 Graupner

Comme les erreurs de pilotages sont une cause importante, sinon la cause principale de crashes, de nombreux systèmes professionnels ne proposent plus la télécommande qu'en option (senseFly), voire plus du tout (Trimble). Le contrôle du vol s'opère alors au moyen d'un PC ou d'une tablette et une connexion Wi-Fi : les vols deviennent quasi automatiques. Miniaturisation oblige, les dernières télécommandes intègrent les informations de vol, le retour vidéo et d'éventuelles manettes dans le même boîtier.



Figure 2-50. Télécommande Yuneec associant des manettes et un écran tactile, utilisé pour le contrôle des paramètres et le retour vidéo

ÉQUIPEMENTS DE RETOUR VIDÉO

Le système vidéo au sol est composé d'un récepteur avec antennes connecté à un écran. L'écran peut être celui de l'ordinateur portable utilisé pour le contrôle du vol, en passant par une clé USB d'acquisition vidéo. Cette solution est simple à mettre en œuvre et permet l'enregistrement de la vidéo sur l'ordinateur. Il se produit néanmoins une latence, un temps entre la réalité et la restitution à l'écran, qui peut dépasser 1 s. C'est pourquoi les professionnels utilisent de préférence un écran vidéo, par exemple un écran de 7 pouces. Il peut reposer sur un tripode au sol ou, le plus souvent, être solidaire du reste de la télécommande, pour être toujours sous les yeux du télépilote, même en se tournant vers le drone en vol.

Une dernière possibilité est le port de lunettes vidéo : elles donnent l'impression d'avoir devant soi un écran d'1 m² placé à 1 m. Cette option est peu usitée à titre professionnel, car elle coupe le télépilote de son environnement immédiat et le retrait des lunettes crée toujours un éblouissement, le temps de se réhabituer à la lumière ambiante. Elles peuvent être utilisées par une tierce partie n'intervenant pas directement dans la mission, comme on ferait monter un passager à bord.



Figure 2-51. Lunettes vidéo

Idéalement, le trajet du signal entre l'émetteur et le récepteur s'effectue à vue, c'est-à-dire sans obstacle. Dans les faits, le signal provient aussi du signal d'origine réfléchi contre les obstacles environnants. Il arrive alors avec des retards et des affaiblissements temporaires qui perturbent l'image. La solution pour pallier les trajets multiples du signal consiste à diversifier la réception sur deux antennes réglées chacune sur une longueur d'onde légèrement différente. Le récepteur commute la réception à l'antenne recevant le meilleur signal.

Il doit y avoir une séparation entre la fréquence de contrôle et la fréquence vidéo, pour éviter tout risque d'interférence. Comme la fréquence de contrôle est presque toujours 2,4 GHz, la fréquence du lien vidéo est 5,8 GHz (entre 5,740 GHz et 5,860 GHz). Les récepteurs et émetteurs ont généralement quelques canaux préenregistrés, qui peuvent être changé par une simple pression sur un bouton ou un microswitch. Il est plus simple d'alimenter le récepteur vidéo et l'écran par la même batterie, quitte à installer un transfo entre les deux si nécessaire.

Les antennes sont :

- omnidirectionnelles (rondes), la réception est la même dans toutes les directions ;
- ou directionnelle (plates) et doivent être pointées en permanence vers un gisement.

Les antennes omnidirectionnelles sont donc les plus pratiques, mais elles sont peu performantes. Pour bénéficier des performances des antennes directionnelles sans avoir à les pointer manuellement vers le drone, il est possible de les installer sur un plateau motorisé se pointant en direction et en hauteur du drone.

ÉQUIPEMENTS INFORMATIQUES

Avec les drones, un simple PC portable ou une tablette se transforme en poste de pilotage et d'analyse.



Figure 2-52. Un logiciel de vol et un radio modem suffisent pour transformer votre PC ou tablette en station sol. Notez les antennes des radios modems.

Il faut choisir un PC dont la visibilité de l'écran demeure correcte dehors. Le cas échéant, la confection de pare-soleil est nécessaire. Il faut aussi privilégier l'autonomie la plus longue possible. Une tablette tactile permet de gagner en ergonomie. Les tablettes avec stylet durcies de géomètres sont particulièrement adaptées aux conditions de chantier.

Le PC ou la tablette communique vers le drone via un radio modem qui se branche sur une prise USB. La fréquence et puissance autorisée en Europe sont respectivement de 433 MHz et de 100 mW. Cela permet en pratique une portée allant jusqu'à 4 km.

Moyens de lancement et de récupération

Nous n'évoquerons ici que les voilures fixes, car les voilures tournantes décollent et atterrissent sans moyen au sol.

MOYENS DE LANCEMENT

Lancer manuel

Les drones légers peuvent être lancés à la main. Ainsi, le MAVinci Sirius ou le senseFly eBee ont une puissance suffisante pour être simplement lâchés, sans poussée initiale. Mais au-delà d'une certaine taille et d'une vitesse de décollage élevée, un lancer à la main devient dangereux, voire impossible. Courir sur un terrain inégal un drone à la main, moteur plein gaz, peut entraîner des blessures graves, notamment en cas de heurt avec une hélice propulsive. Les ailes volantes sans fuselage sont très difficiles à agripper et, pour cette raison, sont plutôt du domaine des loisirs.



Figure 2-53. Un télépilote cravaté lance un MAVinci Sirius. Quelle classe !



Figure 2-54. Lancement d'une aile volante eBee, après l'avoir tenue par les extrémités

Lancer par catapulte

Les catapultes procurent à coup sûr l'accélération et l'angle de lancement optimum, pour un décollage sans faute. Elles fonctionnent le plus souvent comme une arbalète : un tube contient un élastique tendu par une crémaillère et une manivelle. Une poignée libère la crémaillère : le drone, installé sur un chariot, est projeté. L'élastique doit être remplacé après un certain nombre de lancements et son efficacité peut être affectée par des températures hivernales.



Figure 2-55. Installation de la catapulte pour le Trimble X100

Décollage par roulage

Pour cela, il faut disposer d'un train d'atterrissage et d'une piste. S'il s'agit d'une piste étroite, le drone doit être télépiloté manuellement pendant le roulage, car les pilotes automatiques ne sont pas encore assez précis pour parvenir à un alignement correct.

MOYENS DE RÉCUPÉRATION

Il est difficile de poser une voilure fixe sur un terrain exigu, car ce type de drone doit suivre, au final, un certain angle de planer. Paradoxalement, leur qualité d'endurance en vol est donc pénalisante à l'atterrissage. Les constructeurs essaient d'y remédier en ajoutant au design :

- des avions traditionnels : des volets d'atterrissage. Ce dispositif augmente la traînée, donc permet une pente d'approche plus prononcée ;
- des ailes volantes : une inversion du sens de rotation du moteur, solution mise en œuvre sur le Trimble UX5. Ainsi, la poussée du moteur est inversée, ce qui augmente l'angle de descente ;
- un parachute d'atterrissage : le drone ouvre son parachute et coupe le moteur lorsqu'il est arrivé dans la zone et altitude préprogrammées. Le vent peut évidemment affecter la précision de ce type de récupération. Le parachute présente l'avantage de pouvoir être aussi utilisé pour une interruption sans danger du vol en cas de défaillance.



Figure 2-56. Récupération par parachute : le C-ASTRAL à quelques secondes de l'impact

Les militaires possèdent également d'autres méthodes :

- récupération d'une voilure fixe dans un filet : cela nécessite un guidage de haute précision, par exemple avec un GPS différentiel ou un guidage par vidéo ;
- chute suivie d'une dislocation programmée comme pour le drone Raven : arrivé à son point d'atterrissage, l'empennage se cabre complètement. L'aéronef chute. L'énergie cinétique est absorbée par un désemboîtement programmé de pièces qui peuvent ensuite être facilement remboîtées. Astucieux !

Dispositifs de sauvegarde et de sécurité

Contrairement aux aéronefs pilotés, dont les circuits vitaux sont doublés, les drones n'ont pas la place à bord pour de la redondance. Ils sont donc intrinsèquement moins fiables. De plus, un pilote à bord peut remarquer un bruit, une odeur, une fumée ou des vibrations

anormales et prendre les mesures qui s'imposent. Le drone, lui, ne peut compter que sur ses capteurs. Grâce au lien téléométrique, ceux-ci peuvent déclencher sur la station sol des alarmes visuelles, sonores ou vibrantes pour notifier :

- une hauteur trop élevée ou trop basse ;
- une distance trop élevée ;
- un niveau de batterie de vol insuffisant ;
- une dégradation ou perte du lien GPS ou radio.

Les alarmes peuvent être accompagnées ou non d'actions de sauvegarde automatique : par exemple, en cas de coupure du lien radio, la fonction RTH (Return To Home) ou Land s'enclenche. Cette même fonction peut s'enclencher s'il pénètre dans une zone interdite sur choix du télépilote. L'ultime secours vient du parachute à bord. C'est d'ailleurs une obligation réglementaire pour tout vol en agglomération pour les drones de plus de 2 kg.



Figure 2-57. Un parachute de 2,5 m² de marque française Opale (à gauche) est visible dans la poche orange du drone Spyder 700 du Belge Sky Hero (à droite).

Les parachutes peuvent être classés en deux catégories. Les premiers s'ouvrent par gravité. Le parachute est maintenu plié sous une platine, dans une poche reliée à un élastique au drone. En tournant, la roue du servo libère l'élastique, ce qui provoque l'ouverture de la pochette. Le parachute tombe et s'ouvre sous l'effet du vent des hélices. Le drone bascule alors sous le parachute et se pose.

Pour gagner en temps d'ouverture, les parachutes de dernière génération disposent d'un système d'éjection : un ressort, une cartouche de gaz ou un moyen pyrotechnique. Ils sont éjectés par le haut.

Il faut que le drone soit à une certaine hauteur pour que le parachute ait le temps de s'ouvrir et de freiner la chute. Leur utilité fait débat pour des travaux d'inspection d'ouvrages où, justement, les hauteurs de vol sont faibles car elles correspondent à la hauteur de l'ouvrage.



Figure 2-58. Parachute Mars 58 logé dans un tube et s'éjectant avec un ressort

COMMENT VOLE UN DRONE ?

« L'homme doit s'élever au-dessus de la Terre – aux limites de l'atmosphère et au-delà – ainsi seulement pourra-t-il comprendre tout à fait le monde dans lequel il vit. »

Socrate

Qu'un avion vole, cela n'étonne plus personne après un siècle d'aviation. Mais pour certains drones, il y a de quoi se poser à nouveau la question. Ce chapitre rappelle les grands principes du vol, et les applique aux drones. De plus, en raison de leur faible poids, les drones sont sensibles au vent : cet argument météorologique doit être pris en considération par l'apprenti pilote.

Un peu de théorie

Pauvres Terriens que nous sommes : tout corps sur Terre a une masse et la gravité nous entraîne irrémédiablement vers le sol.

En revanche, nous avons la chance d'être entourés d'air, doté d'une certaine densité. On s'en rend compte lorsqu'on met la main hors de la fenêtre d'une voiture : on sent la force du « vent relatif » qui pousse la main dans la direction opposée au sens de déplacement de la voiture. Cette force s'appelle en aéronautique la « traînée » ; elle s'oppose à la direction que l'on veut prendre. Cependant, si l'on met la main à plat, on sent beaucoup moins la force du vent. Pourquoi ? Parce que la section exposée au vent a diminué et que la section restante (le tranchant de la main) fend l'air, rendant la surface exposée plus aérodynamique.

Pour trouver des formes aérodynamiques, il suffit de regarder la nature. Ainsi, la goutte d'eau, lorsqu'elle tombe du ciel, prend une forme ronde à l'avant et effilée à l'arrière. Il y a donc moyen de réduire la traînée en adoptant une forme adéquate. Maintenant, reprenons l'exemple de la main à l'extérieur de la fenêtre de la voiture : gardez la main à plat mais inclinez-la légèrement (j'espère que ce n'est pas vous qui êtes au volant !). La sensation de résistance reprend. C'est normal, puisque la section exposée au vent a augmenté à nouveau. Mais une deuxième force s'est ajoutée : la main a envie de monter. En inclinant la main, vous avez créé un angle avec le vent. En aéronautique, cet angle s'appelle l'« angle d'incidence », simplement résumé par « incidence » et la force qui fait monter la main est la « portance ». Variez la vitesse de la voiture, et vous ferez aussi varier les forces aérodynamiques précitées.

Mais user de votre moteur a des limites et puis vous allez dépenser rapidement le plein d'essence. La force de votre moteur s'appelle en aéronautique la « traction ».

Finalement, sur Terre, il y a moyen de générer avec une traction une force aérodynamique capable de vous soustraire à votre condition de rampant (figure 3-1). Voyons comment les avions et hélicoptères s'en servent pour voler et se diriger.

Petit lexique d'aéronautique

- La traînée est la force créée par le vent relatif et qui s'oppose au déplacement.
- L'incidence est l'angle formé par l'inclinaison de la main par rapport à la direction du vent relatif.
- La portance est la force créée par l'incidence de la main et qui pousse la main vers le haut.
- La traction est la force créée par le moteur qui crée le déplacement vers l'avant.

Tout aéronef a pour vocation de voler vite, loin, avec la plus lourde charge utile, et à moindre coût. De fait, tous les constructeurs aéronautiques s'efforcent d'obtenir le maximum de portance pour la moindre traînée et traction, et construire léger.

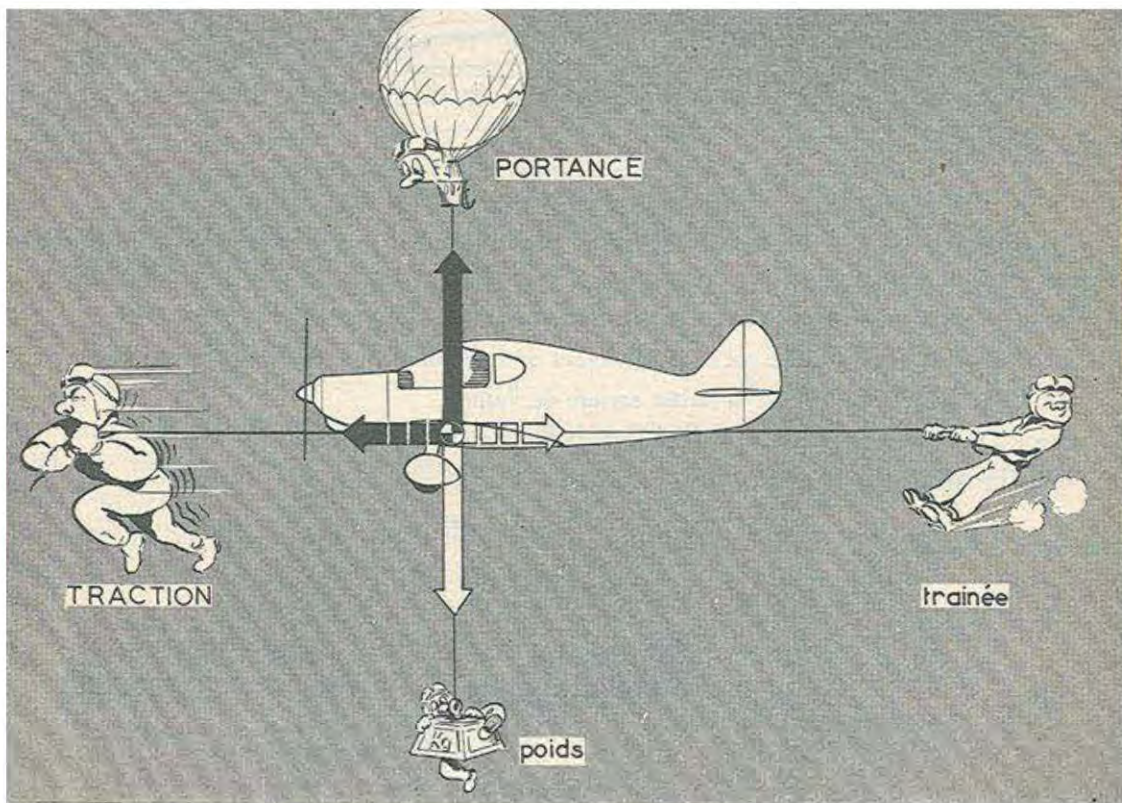


Figure 3-1. Les quatre forces appliquées à un aéronef en vol

Domaine de vol

Le domaine de vol est défini par les limites de vitesse et d'incidence au-delà desquelles l'aéronef ne vole plus et tombe comme une pierre. Il est différent selon que l'aéronef est à voilure fixe ou voilure tournante.

CAS DES VOILURES FIXES

En roulant sur la piste de décollage, l'avion génère du vent relatif sur la voilure et ce vent se transforme en portance dès que l'on crée un angle d'incidence : c'est un moyen indirect, mais efficace.

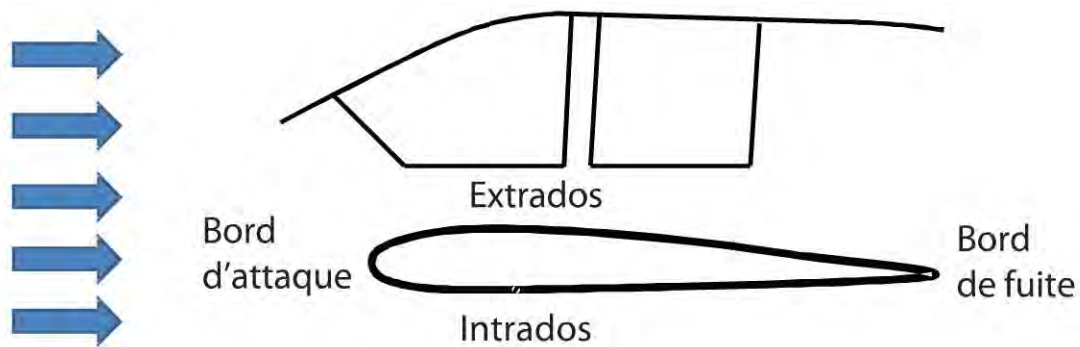


Figure 3-2. Vent relatif et portance

On a compris que la portance d'une voilure est fortement corrélée avec l'inclinaison des bords des ailerons qui va créer un angle d'incidence, ce qui peut se résumer par la phrase « la portance est surtout une histoire d'incidence ». Il faut cependant compléter avec deux autres notions : le profil de l'aile et l'effondrement de la portance.

Profil de l'aile

La portance dépend aussi du profil de l'aile car, en touchant le bord d'attaque d'une aile, les molécules d'air se séparent entre celles qui vont contourner l'aile par l'extrados (le haut) et celles qui vont passer par l'intrados (le bas).

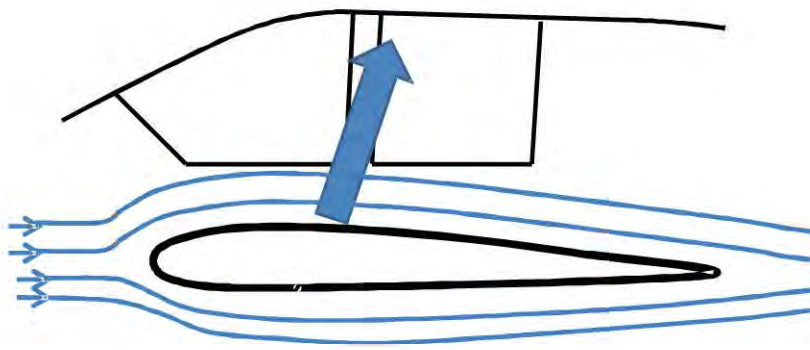


Figure 3-3. Le vent relatif sur l'aile crée la portance.

Ensuite, comme une histoire d'amour, les mêmes molécules se retrouvent au bord de fuite. Comment peuvent-elles se rejoindre alors que le profil d'une aile rend le parcours plus long du côté extrados ? Tout simplement en accélérant. Cette accélération crée une pression moins forte sur l'extrados que sur l'intrados et l'aile est « aspirée » vers le haut.

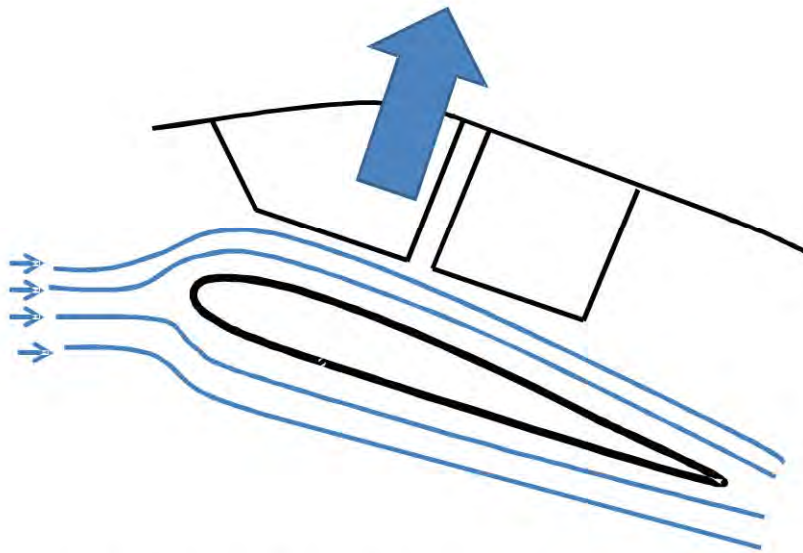


Figure 3-4. Une augmentation de l'incidence entraîne une augmentation de la portance.

Effondrement de la portance

Au-delà d'une certaine incidence, la portance s'effondre et les filets d'air se détachent de l'extrados : on dit que l'aile « décroche ». Un avion se trouvant à cette incidence ne vole plus, il tombe.

Enfin, il faut réaliser qu'en vol en palier, l'incidence et la vitesse sont liées : à basse vitesse, il faut cabrer l'avion (en tirant sur le manche) pour maintenir le palier, sinon l'avion descend ; en haute vitesse, il faut au contraire pousser le manche, sinon l'avion monte. Ainsi, l'incidence de décrochage est aussi une vitesse minimale : la vitesse de décrochage. Le domaine de vol d'une voilure fixe est donc limité par sa vitesse de décrochage.

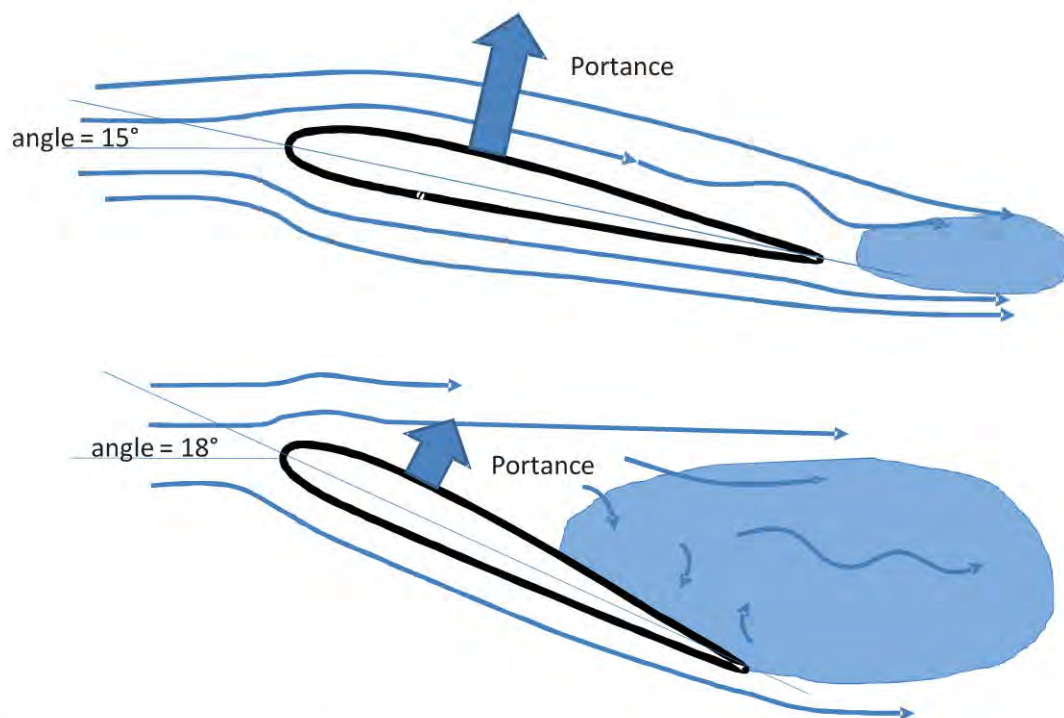


Figure 3-5. Angle d'incidence de 15° (en haut) et de 18° (en bas)

Examinons plus attentivement la figure 3-5. À 15° d'incidence (schéma du haut), la portance est à son maximum mais les filets d'air ne collent plus à la moitié arrière de l'extrados et une zone de turbulence (nuage bleu) se crée au bord de fuite. Si l'incidence est augmentée à 18° (schéma du bas), l'aile décroche, les filets d'air ne collent plus sur presque la totalité de l'intrados. Dès lors, la portance chute et l'avion pique du nez et descend rapidement.

Ce phénomène a deux conséquences.

1. Pour décoller, un drone à voilure fixe doit rouler sur une piste, être lancé à la main ou être catapulté. Les décollages et atterrissages sont presque horizontaux et doivent se faire face au vent, car c'est la vitesse par rapport à l'air qui génère de la portance, non celle avec le sol. Il faut donc disposer d'un terrain assez grand, sans obstacle et bien orienté.
Il ne vole plus en deçà d'une certaine vitesse appelée « vitesse de décrochage » où il se met à piquer, ce qui implique d'accélérer jusqu'à ce que la vitesse revienne dans le domaine du vol. Cette vitesse doit être maintenue jusqu'à l'atterrissage. En touchant le sol, l'avion passe d'une vitesse v (supérieure à celle de décrochage) à une vitesse 0. Cela peut être violent, surtout en mode automatique où l'arrondi, qui est un geste qui nécessite une anticipation de l'approche du sol et devrait donc être réalisé typiquement en mode manuel, n'est pas assuré.
2. Les voilures fixes sont sensibles aux turbulences, souvent présentes près du sol. L'atterrissage est le moment où le drone à voilure fixe y est le plus exposé, car la faible vitesse rend les commandes peu efficaces pour les contrer. Le drone doit respecter un angle de montée maximal au-delà duquel la vitesse (et la portance) chute, ainsi qu'un angle de descente maximal, au-delà duquel la vitesse augmente trop.

CAS DES VOILURES TOURNANTES

Au même titre qu'un avion génère sa portance par la translation d'une voilure, la voilure tournante la génère par la rotation de la voilure. Les pales d'un rotor se comportent comme une petite aile, avec une incidence et un profil. Elles ont un domaine de vol plus étendu que les voilures fixes car elles peuvent voler à vitesse zéro, en stationnaire, sur les côtés ou à reculs, tant que le rotor fournit la portance nécessaire. On l'a vu, une augmentation de cette portance peut être générée simplement par une vitesse de rotation ou un pas plus grand.

C'est là qu'intervient une différence fondamentale entre les drones multirotors et les hélicoptères traditionnels. Les premiers font varier la portance uniquement en modulant la vitesse de rotation des rotors (ceci est rendu possible grâce à la petite taille des hélices, donc à leur faible inertie, et à la motorisation électrique qui peut être contrôlée très finement) ; les seconds maintiennent quant à eux une vitesse de rotation constante du rotor principal, mais modulent la portance uniquement en faisant varier le pas (ceci est rendu possible au prix d'une mécanique beaucoup plus complexe). Cette variation de pas modifie l'incidence des « petites ailes » du rotor sur la portance locale.

La vitesse d'une voilure tournante ne peut dépasser la vitesse d'extrémité des rotors, sinon la portance diminue. Il s'agit d'un mur que l'hélicoptère ou le multirotor ne peut dépasser. Mais il y a de la marge, car à l'extrémité du rotor, la vitesse peut atteindre 400 km/h.

En cas de panne moteur, un hélicoptère présente un avantage indéniable sur le multirotor, car s'il ne plane pas à proprement dit, il peut néanmoins être sauvé par une manœuvre audacieuse : l'autorotation. Il s'agit de moduler le pas du rotor pour qu'il continue à tourner durant la descente, malgré l'absence de force motrice. Arrivé près du sol, le télépilote augmente fortement le pas. Il se produit un surcroît de portance qui ralentit la chute quelques instants pour effectuer un posé « presque » en douceur.

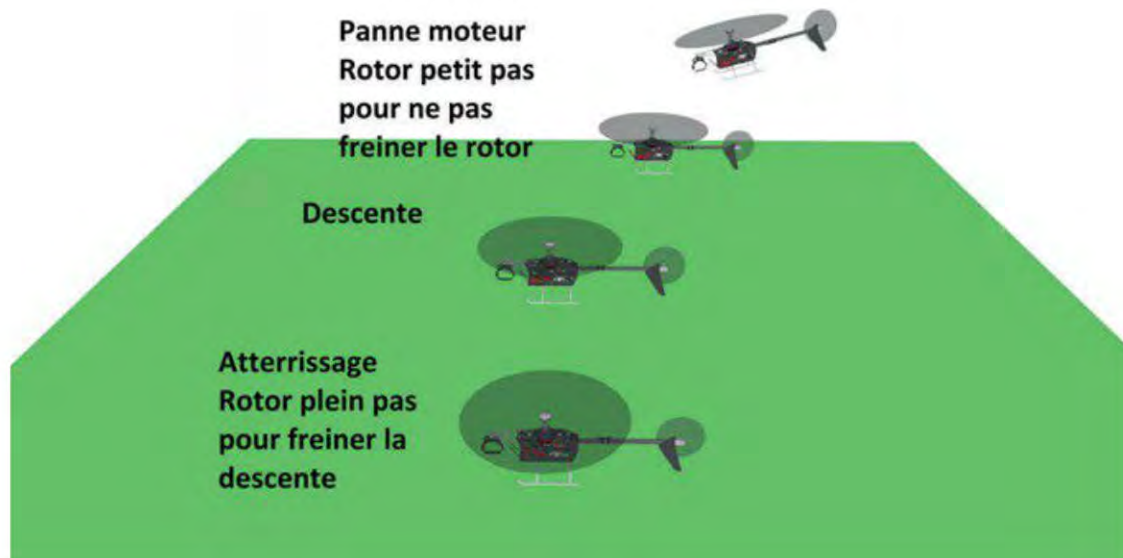


Figure 3-6. Manœuvre d'autorotation pour permettre l'atterrissage en cas de panne du moteur

Le multirotor n'a pas cette possibilité : en cas de panne, il bascule du côté le plus lourd (généralement du côté où est fixée la batterie) et s'écrase ; seul un parachute peut le sauver.

Les voilures fixes et les voilures tournantes ont un ennemi commun : leur masse.

- Un avion lourd est un avion dont le domaine de vol est réduit : il aura une vitesse de décrochage plus rapide et une vitesse de croisière lente, car il faudra maintenir une incidence élevée pour générer la portance nécessaire en toutes phases de vol. En raison d'un surcroît d'inertie, il sera moins maniable et subira des chocs plus nombreux à l'atterrissage.
- Une voilure tournante lourde sera également plus lente et moins maniable et sera surtout moins stable, car il y aura moins de marge de puissance pour contrer les rafales.

Comment se dirige un drone ?

Maintenant que nous savons comment vole un drone, nous allons définir sa position et son mouvement en lui affectant un repère muni de trois axes : « lacet », « tangage », « roulis ». Comment se contrôle-t-il le long de ces trois axes ?

Une voilure fixe se contrôle par des gouvernes aérodynamiques tandis qu'une voilure tournante se contrôle par la vitesse de rotation ou le pas des rotors.

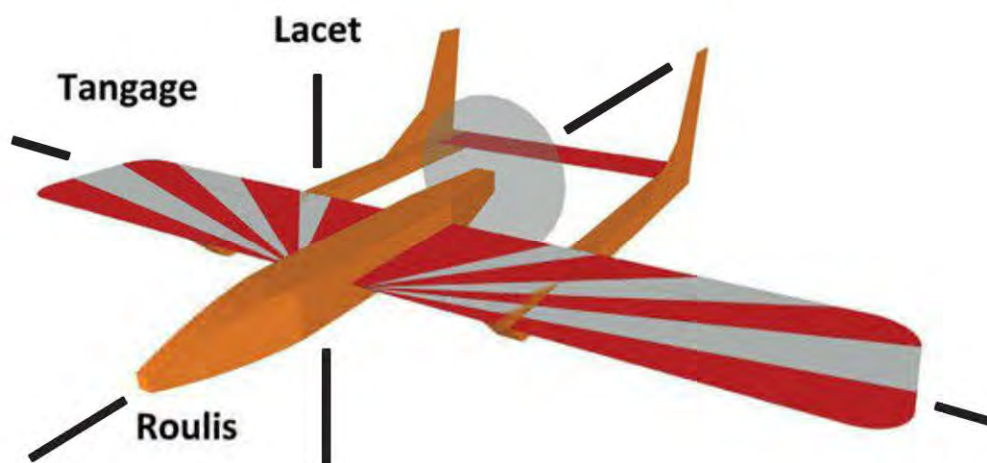


Figure 3-7. Trois axes définissent la position de l'avion : lacet, tangage et roulis.

CAS DES VOILURES FIXES

Les voilures fixes utilisent des surfaces de contrôle mobiles : « ailerons » ou « élevons », « commande de profondeur », « gouvernail ».

Ces gouvernes sont placées le plus loin possibles de l'axe qu'ils contrôlent, pour optimiser leur action via un effet de levier : dans la queue pour le gouvernail et la commande de profondeur ; à l'extrémité des ailes pour les ailerons (avions) ou élevons (ailes volantes).

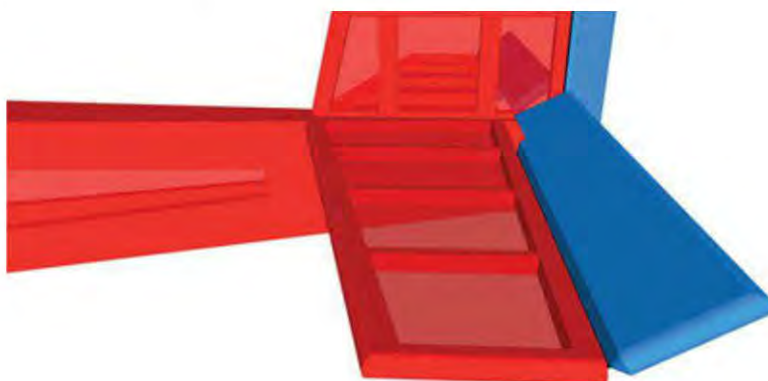


Figure 3-8. Commande de profondeur en bleu : ordre de cabrer



Figure 3-9. Gouvernail : ordre de tourner à droite



Figure 3-10. Ailerons : ordre de tourner à droite

Un avion traditionnel tourne en combinant une action sur les ailerons, le gouvernail et la profondeur (figure 3-11).

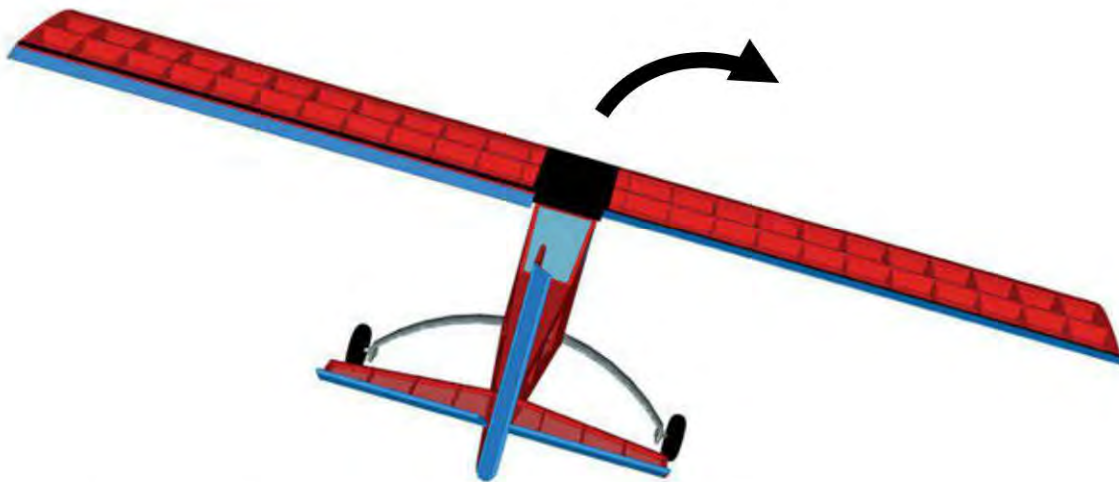


Figure 3-11. Opérer un virage

Une aile volante tourne en actionnant ses élevons en sens inverse (figure 3-12).

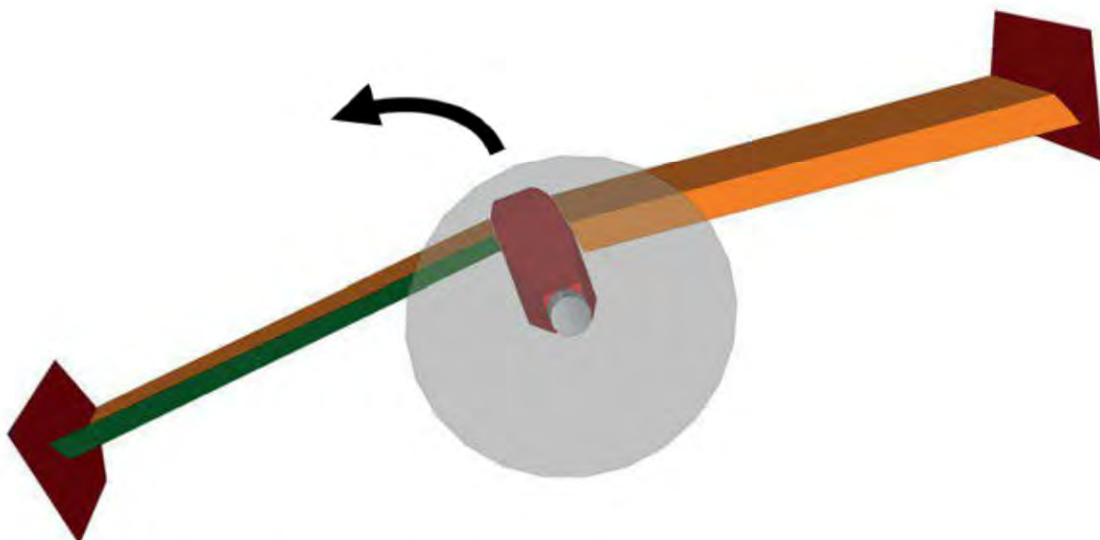


Figure 3-12. Action des élevons pour faire tourner une aile volante

L'aile volante monte et descend en actionnant ses deux élevons dans le même sens (figure 3-13).

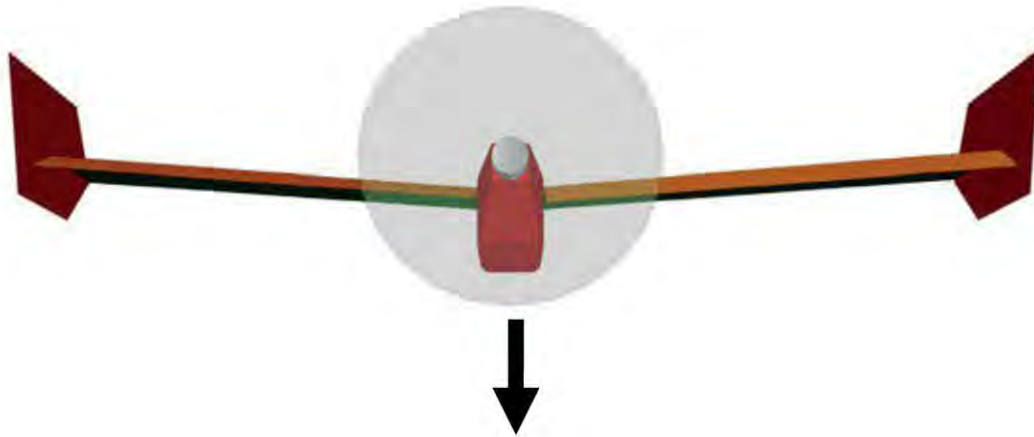


Figure 3-13. Les deux élevons sont relevés : l'aile volante descend.

La montée nécessite une augmentation des gaz et la descente s'effectue à gaz réduit, sous peine de vitesse élevée. Les voilures fixes ont tendance à prendre de l'incidence dans les virages, entraînant une augmentation de la traînée, donc une diminution de la vitesse. Pour garder une vitesse constante, il faut donc augmenter les gaz.

Un autopilote de drone bien réglé agit de façon optimale – beaucoup mieux que ne le fait un télépilote du sol – sur les gouvernes et les gaz en fonction des mesures reçues des capteurs de bord et des paramètres voulus, malgré vent et rafales.

CAS DES VOILURES TOURNANTES

Hélicoptères

Un hélicoptère traditionnel contrôle son vol en changeant le pas d'une ou deux pales du rotor principal, sur tout ou partie de son disque de rotation, ainsi qu'en changeant le pas du rotor de queue. Tout est en fait une question de portance et de couple des forces de rotation.

Contrôle du lacet

En vol stationnaire, le pas du rotor anticouple est réglé pour compenser exactement le couple du rotor principal. Le contrôle du lacet s'effectue en modulant le pas du rotor de queue.

La figure 3-14 décrit pourquoi il est important de compenser le couple du rotor principal à l'aide du rotor anticouple. Lorsque le moment créé par le rotor principal (symbolisé par la flèche rouge) et celui du rotor de queue (symbolisé par la flèche verte) sont égaux, l'hélicoptère est stationnaire (figure 3-14, à gauche). Si le moment du rotor de queue diminue (figure 3-14, au milieu), l'hélicoptère pivote vers la droite. En l'augmentant, il tourne à gauche (figure 3-14, à droite).

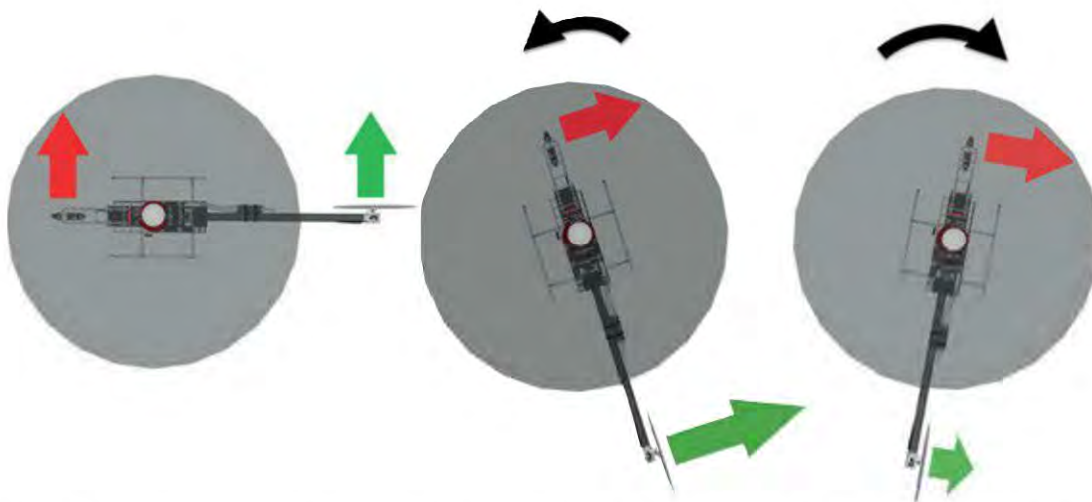


Figure 3-14. Hélicoptère stationnaire (à gauche) : si le moment du rotor de queue diminue, l'hélicoptère pivote vers la droite (au milieu) ; s'il augmente, il tourne à gauche (à droite).

Monter et descendre

Les variations de portance sont réalisées par modification de l'incidence des deux pales en même temps : on l'appelle « pas collectif ».

Pas collectif

- **Monter** : augmentation du pas collectif, et pour contrer le surcroît de couple, le pas du rotor anticouple augmente.
- **Descendre** : diminution du pas collectif et pour contrer la diminution du couple, le pas du rotor anticouple est diminué.

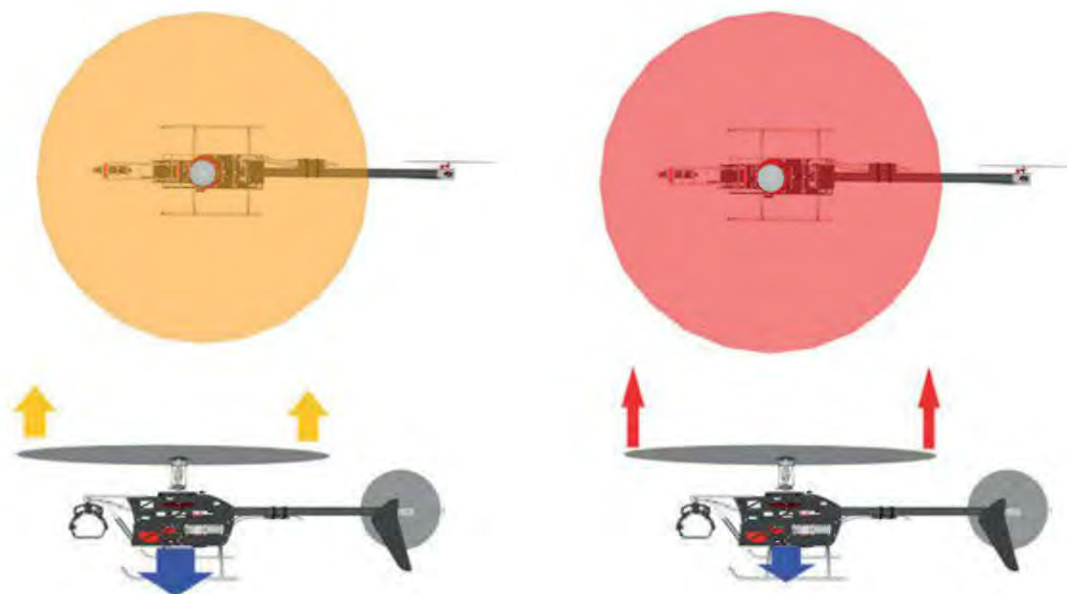


Figure 3-15. En vol stationnaire (à gauche), la portance sur l'ensemble du disque du rotor est égale au poids. En montée (à droite), la portance sur l'ensemble du disque dépasse le poids.

Lorsque le pas augmente, le moteur peine et le régime ralentit. Pour garder le régime constant, les gaz sont augmentés. L'inverse se produit en descente.

Contrôle du tangage et du roulis

Les pales du rotor principal peuvent changer de pas indépendamment l'une de l'autre, plusieurs fois par seconde, à chaque tour. C'est le pas cyclique. Ainsi, il est possible d'augmenter la portance sur une portion du disque du rotor seulement, symbolisé par les demi-cercles rouges sur la figure 3-16.

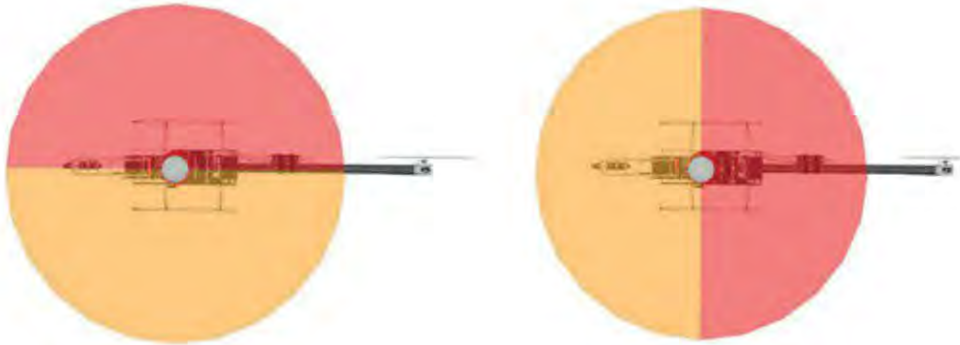


Figure 3-16. Portance augmentée du côté droit de l'hélicoptère, en rouge (à gauche) ; ou sur la portion de disque arrière (à droite)

Pour incliner et faire avancer l'hélicoptère dans une direction, il semble logique d'augmenter la portance de la partie du disque opposée. En fait, il faut tenir compte du phénomène de précession gyroscopique qui décale de 90° (un quart de tour) l'action de la réaction de tout système en rotation. Pour vous en convaincre, prenez la roue de votre vélo, tenez-la à l'horizontale en tendant le bras devant vous. Demandez à quelqu'un de la faire tourner et essayez de l'incliner vers l'avant : oh ! elle part sur le côté ! Pour l'incliner vers l'avant, il faut en fait l'incliner sur un côté : ce phénomène s'appelle la « précession gyroscopique ».

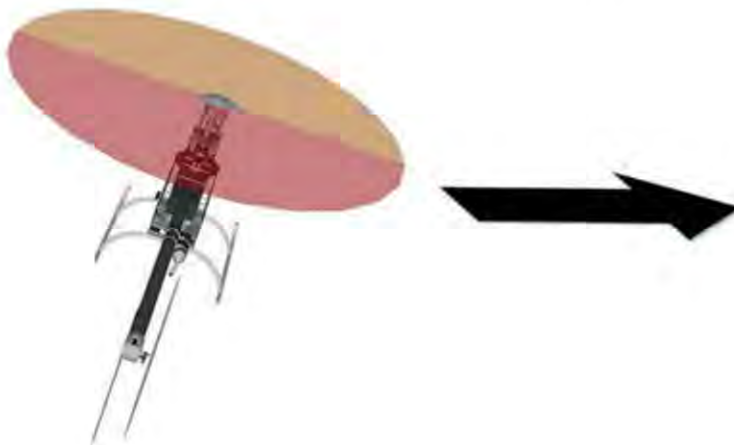


Figure 3-17. Si la portance est augmentée sur la partie arrière du disque, l'hélicoptère effectue une translation vers la droite.



Figure 3-18. Si la portance est augmentée sur la partie gauche du disque, l'hélicoptère avance.

Multirotors

Un multirotor est constitué de paires d'hélices à pas et sens de rotation opposés, et soufflant vers le bas. Sur ce type de drone, le contrôle de tous les axes s'effectue uniquement grâce à la vitesse de rotation des rotors.

Deux sortes de quads

Les quads présentent deux variantes, selon que le moteur avant et l'autopilote sont alignés (type +) ou non alignés (type x) (figure 3-19). La forme x est la plus utilisée pour la prise de vue, car elle permet de dégager le champ de vision de la charge utile vers l'avant.

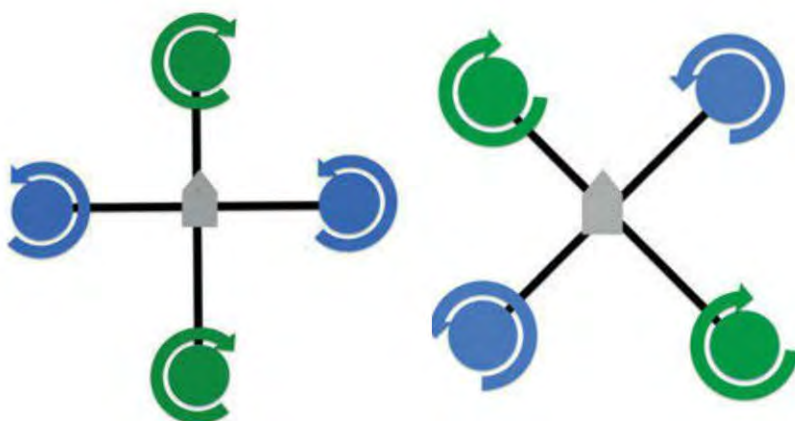


Figure 3-19. Quad type + (à gauche) ; quad type x (à droite)

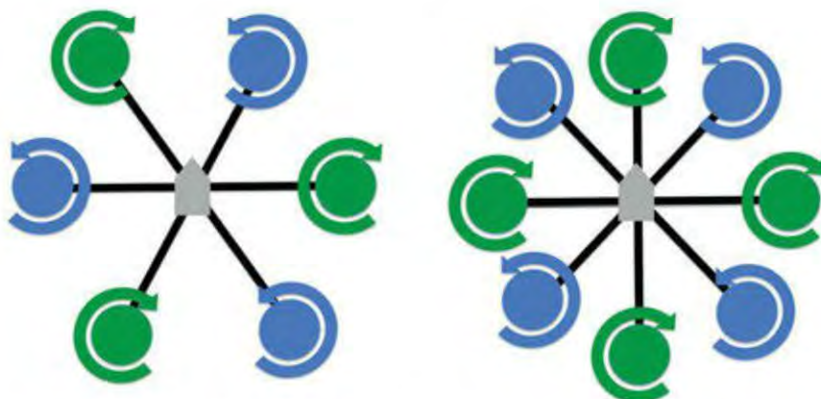


Figure 3-20. Hexacoptère (à gauche) et octocoptère (à droite)

En vol stationnaire, toutes les hélices tournent à la même vitesse et les forces des paires d'hélice s'équilibrent. Pour monter, la vitesse de tous les rotors augmente. Pour avancer dans une direction donnée, le multirotor sort de cet équilibre : la vitesse de rotation de l'hélice qui est opposée à la direction souhaitée est accélérée. Le multirotor bascule dans la direction voulue et avance (figure 3-21).

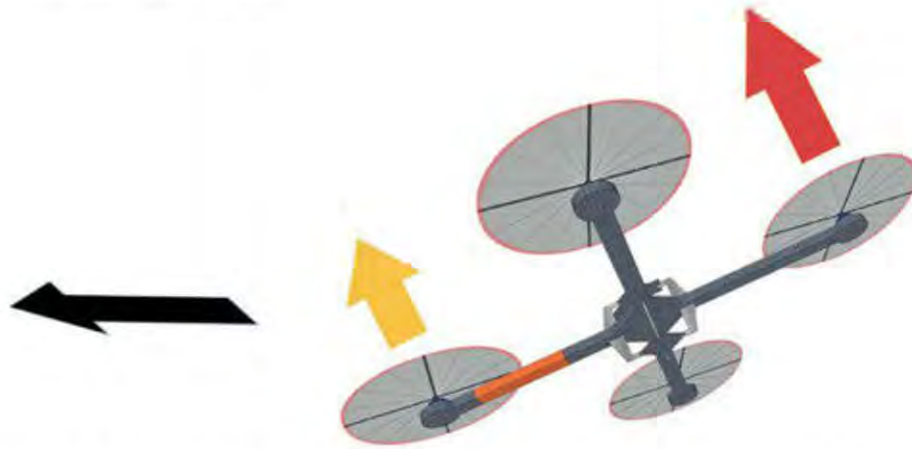


Figure 3-21. Déplacement d'un multirotor : pour avancer, la puissance du moteur avant se réduit et la puissance du moteur augmente. La puissance totale augmente pour maintenir l'altitude tout en prenant de la vitesse horizontale.

Pour contrôler le lacet, il faut créer une force de rotation autour de l'axe vertical : elle est obtenue en faisant varier la vitesse de rotation des paires d'hélice. Par exemple, pour obtenir d'un quad un lacet dans le sens horaire : les hélices avant arrière vont accélérer alors que celles de gauche droite vont ralentir (figure 3-22) ; ainsi le quad tourne dans le sens horaire, tout en restant à la même hauteur.

Pour se diriger, il n'y a pas à se soucier de la vitesse de rotation des hélices puisqu'elle est gérée par l'autopilote : il suffit de bouger une manette de la télécommande.

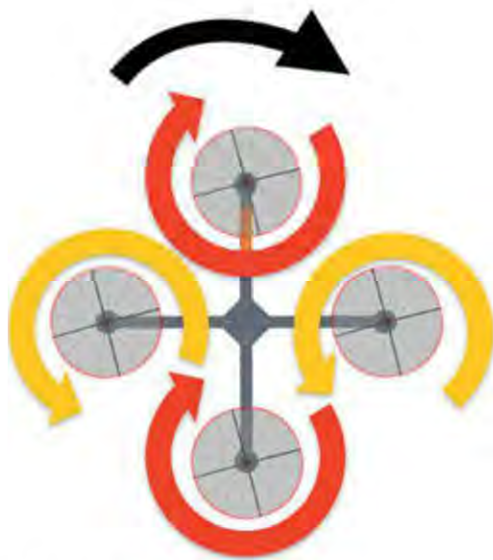


Figure 3-22. Un quad en rotation vers la droite : en rouge les moteurs accélérant, et en orange, ceux décélérant

Vous l'avez compris : les hélices d'un drone multirotor passent leur temps à accélérer ou à décélérer. Jusqu'à présent, l'énergie cinétique du freinage était perdue et ce freinage, surtout aérodynamique, est perfectible. Les constructeurs développent de nouveaux contrôleurs capables de freiner et récupérer de l'énergie pour recharger la batterie. Le gain de temps de vol annoncé est de près de 10 %.

Plus il y a de rotors, plus le drone est stable : avec un grand nombre de rotors, il y a en effet plus de chance d'avoir un rotor placé dans la direction d'où vient la rafale à contrer !

Une inclinaison de plus de 30 % fait chuter la portance avec, comme conséquence, un plongeon et une prise de vitesse. Certains autopilotes, tels que ceux développés par DJI, ont une fonction de limitation d'inclinaison.

Importance de la météo

On distingue dans l'écoulement d'une rivière des vagues, des tourbillons, des accélérations... Il se passe la même chose dans l'air, puisque c'est aussi un fluide, mais ces phénomènes ne se voient pas. C'est pourtant l'environnement dans lequel évoluent les drones. Très légers, ils y sont particulièrement sensibles.

VENT

Quelle force de vent un drone peut-il supporter ? En fait, la moindre brise vient altérer ses performances : le vent augmente la consommation électrique, car le drone doit lutter pour avancer ou rester stationnaire. Un vent de travers crée une dérive. Pour tenir son plan de vol, un avion se met à voler « en crabe » en se tournant dans le sens du vent : la vitesse air reste constante, mais sa vitesse sol diminue. Par exemple, si un avion volant à 80 km/h a du vent de travers (perpendiculaire) de 40 km/h, il se tourne à 45 % vers le vent pour suivre son plan de vol et sa vitesse sol est réduite à 40 km/h. Il lui faut le double de temps pour parcourir la même distance, ce qui, compte tenu de la faible capacité des batteries, équivaut parfois à envisager un plus grand nombre de vols pour accomplir la même mission.

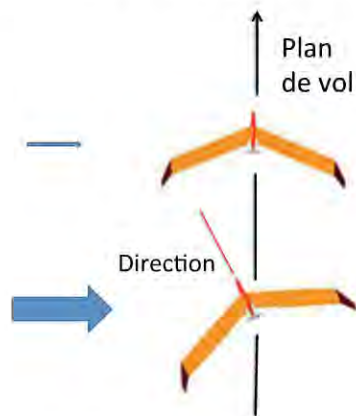


Figure 3-23. Par vent de travers, un avion doit se tourner dans le sens du vent pour continuer à suivre un plan de vol.

Pour rester stationnaire, une voilure tournante se penche dans le sens du vent et doit accélérer ses rotors (figure 3-23). L'autonomie en pâtit.

En règle générale, il ne faut pas que le vent dépasse la moitié de la vitesse maximale du drone, c'est-à-dire pas plus de 40 km/h pour une voilure fixe rapide telle que le Trimble X100, 25 km/h pour un multirotor de 4 kg et 10 à 15 km/h pour un drone d'environ 1 kg.

On peut dire que dans la plupart des régions de France, on peut voler presque toute l'année. Et puis, contrairement à l'aviation grandeur nature, il n'y a pas à se soucier de la météo du voyage aller et du voyage retour, car seule la météo locale aux heures de la mission compte !

Vent



Figure 3-24. Par vent faible, le quad reste droit en vol stationnaire. Si une rafale le pousse, il se penche du côté du vent et accélère ses moteurs pour essayer de revenir à sa position de départ.

Le plus à craindre sont les rafales imprévisibles. Elles transforment un plan de vol rectiligne en une suite de zigzags, ruinant une acquisition photogrammétrique et un vol stationnaire en un jeu de yoyos verticaux. De quoi donner le mal de l'air à ceux qui regardent la vidéo !

Les rafales sont plus fortes près du sol, car l'air tourbillonne à proximité des obstacles ou à la surface du sol par friction. Elles sont dangereuses à l'atterrissage d'une voilure fixe, car elles peuvent provoquer des décrochages successifs, à basse vitesse. Il faut aussi se souvenir que lorsque le vent s'engouffre dans un environnement étroit (entre deux immeubles ou deux montagnes), sa vitesse augmente : c'est l'effet venturi. De plus, la vitesse du vent augmente avec l'altitude. Le vent à 100 m du sol est souvent supérieur d'environ 10 km/h par rapport au sol. Si un drone dérive à cause du vent, le premier réflexe à avoir est de descendre à une hauteur où le vent est moins fort.

COURANTS ASCENDANTS ET DESCENDANTS

Pour compliquer le tout, l'air est souvent turbulent s'écoulant sans organisation apparente. Cet écoulement produit des effets dynamiques aux abords des reliefs : ascendance sur le côté exposé au vent (ce qui peut de façon positive prolonger la durée de vol) et descendance, voire action « rabattante ». Attention donc aux vols en montagne, ou aux abords des dunes et des falaises du bord de mer.

Le rayonnement du soleil sur le sol produit lui aussi des mouvements convectifs. Contrairement à une idée reçue, ils sont ressentis dès quelques dizaines de mètres de hauteur. Les cumulus, ces petits nuages bien détachés, sont l'épicentre d'ascendances. Mais par temps très sec, il peut y avoir des ascendances sans cumulus. Le drone risque de jouer aux montagnes russes le long de son parcours, malgré l'aide de son autopilote et des moteurs.

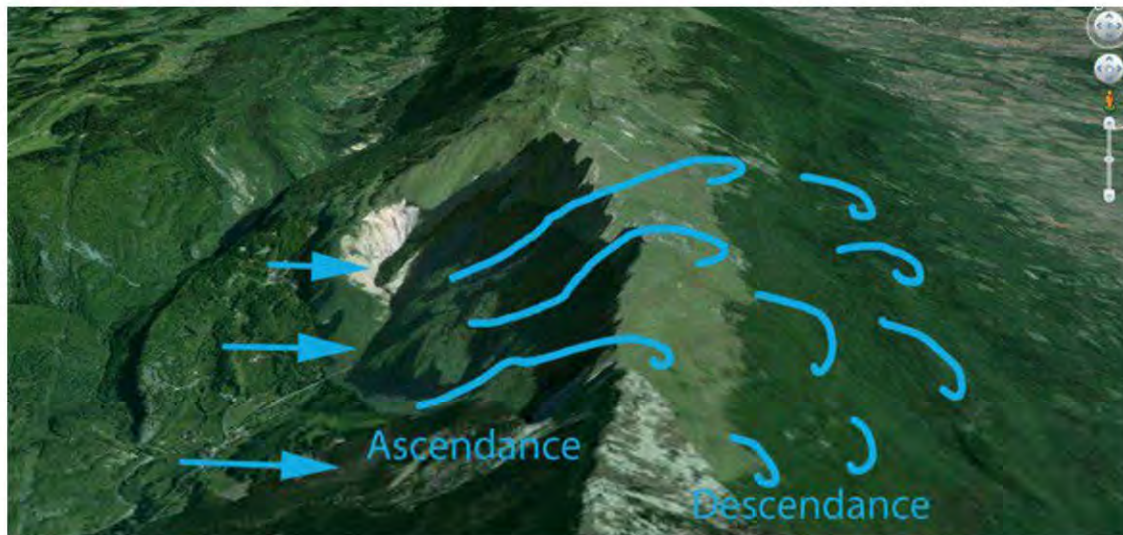


Figure 3-25. Le côté sous le vent reçoit des courants descendants et des forces rabattantes.

NUAGES ET PLUIE

Un démon souvent méconnu des non-initiés est à éviter : les cumulonimbus, ces nuages en forme d'enclume annonciateurs d'orage. Ils s'accompagnent d'averses, de grêle ou de

vents cisailant. Du plus petit Cessna à l'Airbus le plus imposant, tout aéronef les évite pour échapper à de fortes turbulences pouvant aller jusqu'à la perte de contrôle ; ils risquent d'aspirer un drone à voilure fixe à des milliers de mètres de hauteur. L'effet de ces nuages peut se faire sentir à plus de 10 km. Il est prudent d'attendre leur éloignement pour décoller.

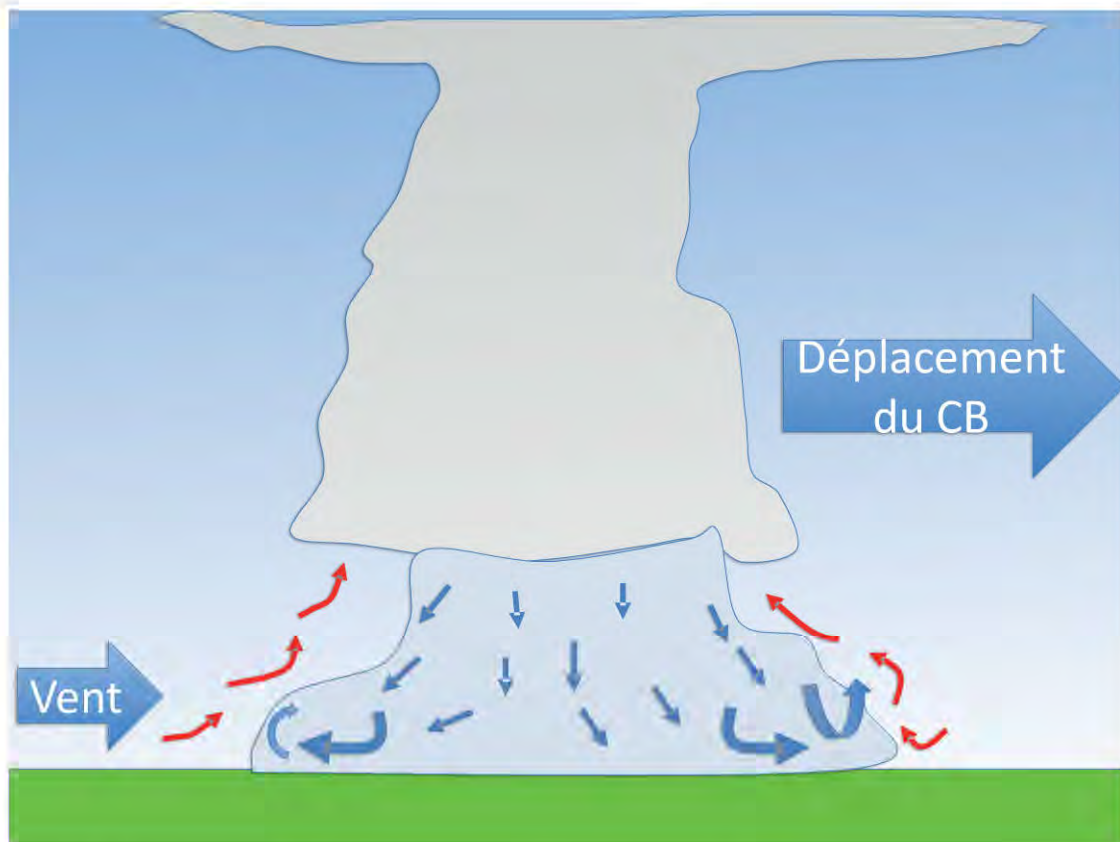


Figure 3-26. Courants engendrés par les cumulonimbus (d'abréviation courante CB)

Tout nuage est, de toute façon, un ennemi. Il risque de vous faire perdre de vue votre outil et aussi de masquer l'arrivée d'un éventuel intrus, avion ou hélicoptère, que vous devez éviter.

En hiver, les nuages peuvent être bas, se situant à une hauteur difficile à estimer. Un seul moyen s'offre au pilote averti : lire la météo aéronautique qui annonce heure par heure la hauteur de la base des nuages et prendre une marge de sécurité par rapport à ces indications.

L'électronique n'aime pas l'eau ! Même si certains avions, parce que dotés d'une structure relativement fermée et étanche, peuvent supporter une pluie fine, la plupart des multirotors sont moins protégés. La pluie viendra de toute façon gâcher les images que vous pourriez prendre (surtout les images obliques). Et puis, les gouttes de pluie risquent de mouiller l'optique...

Finalement, quelle que soit leur taille, drone ou grandeur nature, avions et hélicoptères sont soumis aux mêmes lois de physique et, dans une moindre mesure, aux mêmes contraintes météo.

Il est temps maintenant de prendre le manche !

COMMENT TÉLÉPILOTER UN DRONE ?

« Je vole car cela libère mon esprit de la tyrannie des choses insignifiantes. »

Antoine de Saint-Exupéry

Un drone peut voler de façon autonome grâce à son autopilote, mais il faut un maître au sol pour conduire la mission.

La combinaison d'une télécommande, d'un ordinateur, du GPS et de la vidéotransmission permet aujourd'hui des formes de télépilotage qui s'écartent totalement de l'aéromodélisme. L'informatique autorise aussi des modes de vol plus ou moins automatiques. L'automatisation est seule à accomplir certaines missions, mais le télépilote doit rester vigilant tout au long du vol. Les données enregistrées peuvent être analysées ou rejouées ultérieurement.

Différents types de télépilotage

TÉLÉPILOTAGE À VUE DIRECTE

Le vol à vue est le mode traditionnel.

Le télépilote détermine de visu l'attitude du drone sur ces axes et la distance au sol et aux obstacles. Il le stabilise et le dirige en bougeant les manettes d'une télécommande. Le vent et les rafales doivent être contrés continuellement, ce qui nécessite une bonne acuité visuelle et une coordination permanente des actions, donc une concentration aigüe. La perte de vue du drone, ne serait-ce que le temps d'un éternuement ou d'un échange avec un tiers, peut conduire à un crash.

Maintenir une assiette de vol constante n'est pas facile avec une voilure fixe, mais cette contrainte est encore plus difficile avec une voilure tournante, en raison de l'épuisement progressif de la batterie, qui doit être compensée par une augmentation progressive des gaz. De plus, le télépilote peut manquer de repères visuels pour distinguer l'avant d'une voilure tournante au loin et son sens d'avancement.

Le retour du drone face à soi est délicat, car les commandes sont « inversées ». Le plus simple est de s'imaginer à bord de l'appareil et de tourner un peu les épaules au besoin. Il est presque impossible de télépiloter en manuel et de contrôler une charge utile en même temps.



Figure 4-1. En mode manuel, le drone ne doit pas être quitté des yeux.

En s'éloignant sur l'horizon, le drone offre de moins en moins une vue de dessous et de plus en plus une vue « à plat », de sorte qu'il devient difficile de déterminer sa direction. Ainsi, un aéronef qui s'éloigne donnera l'impression de descendre et un aéronef qui s'approche donnera l'impression de monter. Attention aussi à ne pas le perdre dans le soleil, sous peine d'un éblouissement fatal.

Pour toutes ces raisons, le télépilotage manuel doit se dérouler pendant un temps nécessairement court, par exemple en le réduisant aux phases qui requièrent une grande précision, telles que le décollage, l'atterrissage ou le vol à proximité d'obstacles. Il peut aussi s'imposer en cas de défaillance ou pour éviter un obstacle.

VOL EN IMMERSION PAR VIDÉOTRANSMISSION

Quel aéromodéliste n'a jamais rêvé de piloter son modèle depuis un écran vidéo, avec l'impression d'être à bord ?

C'est possible depuis moins de dix ans grâce à la miniaturisation des émetteurs. Cependant, télépiloter de la sorte est encore plus difficile qu'un pilotage à vue directe. Le télépilote doit s'habituer aux mouvements incessants de l'image ; il est vite désorienté s'il perd le contact avec la ligne d'horizon, par exemple quand la caméra regarde vers le ciel ou le sol. Sans point de repère au sol, le risque est grand de se perdre et de s'éloigner au point de dépasser la portée de la vidéo transmission, tandis que suivre une trajectoire rectiligne relève de l'exploit. Le champ de vision de la caméra à bord peut ne pas être pas suffisant pour avoir une vision globale. A contrario, une image « grand-angle » comporte des distorsions : les distances et les reliefs sont difficiles à estimer sur une image en deux dimensions.

Enfin, l'image peut être momentanément brouillée par des interférences, comme la présence d'obstacles ou les vibrations de l'aéronef ; l'image est parfois surexposée en cas de pointage vers le soleil ou sous-exposée dans une zone d'ombre.

Le vol en immersion est généralement aidé par l'incrustation sur l'image (OSD pour *On Screen Display*) de paramètres de vol (horizon artificiel, cap, altitude...).



Figure 4-2. Une image de retour vidéo avec en incrustation les principales indications nécessaires au pilotage : horizon artificiel, altitude, cap, consommation électrique...

La réglementation oblige le télépilote, en vol en immersion, à être aidé par un observateur qui garde toujours la vue directe du drone.

Compte tenu de toutes ces difficultés à télépiloter un aéronef par le lien vidéo seul, ce dernier est moins destiné au pilotage qu'au contrôle de la charge utile.

Des simulateurs de vol peuvent aider les novices au vol manuel et épargner les premières casses. Ils sont aujourd'hui très réalistes car ils disposent d'une bibliothèque de machines aux caractéristiques visuelles et aux performances différentes. Il est aussi possible de modifier les paramètres météo et l'environnement de vol : campagne bucolique, champ de course, ou même parking souterrain. Attention cependant à ne pas les prendre pour un jeu vidéo, dont le joueur aurait un nombre de « vies limitées » !



Figure 4-3. Les simulateurs permettent d'acquérir les premiers réflexes, sans casse.

VOL À LA SOURIS D'ORDINATEUR

Au-delà de quelques centaines de mètres de distance, il est difficile d'évaluer précisément la position du drone par la simple vue directe. Le pilotage sur un écran d'ordinateur avec un logiciel de navigation cartographique s'impose. Les ordres de vols ne sont plus les classiques « tourne à gauche » ou « monte », mais « vole là-bas ». Derrière son pupitre, le télépilote ressemble de plus en plus à un contrôleur aérien. Ce type de pilotage, qui s'adresse surtout aux vols « hors vue », a été fortement réglementé par l'aviation civile en raison des dangers vis-à-vis du trafic aérien et de la population au sol.

La présence d'automatismes va permettre de réaliser un véritable travail professionnel.

Différents modes de vol

Les fidèles du salon du Bourget, habitués aux acrobaties des avions de chasse, risquent d'être déçus par une démonstration de drones. Un drone professionnel en vol n'a en effet rien de spectaculaire : il est d'une stabilité déconcertante et se perd vite de vue. Seule une retransmission en direct du lien vidéo sur grand écran maintient un tant soit peu l'attention du public – jusqu'à ce qu'elle retombe de nouveau, cette fois à cause de la monotonie et des imperfections des images. Les vols de drones, en grande partie automatiques, sont vite lassants.

L'automatisme allège la charge de travail du télépilote, qui peut se concentrer sur le déroulement de la mission et le contrôle de la charge utile. Entre un vol purement manuel et un vol entièrement automatique, il existe de nombreux modes intermédiaires qui peuvent être sélectionnés manuellement du sol, en séquences programmées, ou s'actionner d'eux-mêmes en cas d'événements.

Pour des raisons de sécurité, le télépilote garde toujours la possibilité de reprendre la main sur un vol automatique, car une action sur les commandes prévaut sur le reste.

EN MODE STABILISÉ (AIDÉ)

Le télépilote garde le contrôle direct des commandes, tandis que l'autopilote maintient l'altitude et stabilise le drone dès que les manettes sont relâchées. Les rafales de vent sont ainsi contrées automatiquement. Les virages d'une voilure fixe deviennent faciles, car il suffit de toucher aux ailerons : l'autopilote soutient la profondeur et donne un coup de gouvernail. L'autopilote empêche que les limites d'inclinaison ou de tangage soient atteintes, même si le pilote insiste.

Ce mode pardonne les erreurs de pilotage, en maintenant le drone dans son domaine de vol. Il a ses limites au décollage et à l'atterrissage, car il ne permet pas des manœuvres aussi serrées qu'en mode manuel.

Tous les modes mentionnés ci-après nécessitent une réception GPS.

EN MODE STATIONNAIRE (POSITION HOLD)

Avec ce mode, une voilure tournante devient stationnaire, même en cas de vent. Elle maintient sa position grâce au GPS. Une voilure fixe maintient son altitude et tourne en cercle autour du point où elle se trouvait quand ce mode a été enclenché.

Ce mode libère momentanément le télépilote qui peut alors se concentrer à plein sur le contrôle de la charge utile : cadrer et prendre des photos. Le drone devient alors un « mâât photographique volant » capable de monter et descendre tout en maintenant sa position et sa direction. Ce peut être aussi un mode d'attente, pour éviter un danger ou souffler un peu.

Une action sur les commandes permet d'effectuer une manœuvre ; dès que les commandes sont relâchées, l'aéronef se remet en Position Hold.

EN MODE RETOUR À LA MAISON (RETURN TO HOME)

Il s'agit de la meilleure parade face à un éloignement excessif, puisque l'aéronef revient à la position GPS enregistrée lors de la mise en route.

Le mode RTH (Return to Home) peut se dérouler en plusieurs séquences : en premier lieu, il permet au drone d'atteindre une altitude de sécurité déterminée à l'avance, pour passer au-dessus d'obstacles ; puis il lui fait prendre la direction Home ; arrivé à destination, le drone peut passer en mode Position Hold pour laisser le choix au pilote de reprendre le contrôle, ou se poser automatiquement.

Ce mode est souvent couplé avec un dispositif de sauvegarde appelé *fail safe* : il s'enclenche automatiquement en cas d'événement tel qu'une coupure de liaison radio ou d'un niveau prolongé de batterie trop faible. Il n'est opérant, bien sûr, qu'en cas de maintien du signal GPS.

ATTERRISSAGE ET DÉCOLLAGE AUTOMATIQUES

Pour une voilure tournante, il suffit d'appuyer sur un bouton pour que le drone s'élève de quelques mètres et reste stationnaire, ou qu'il descende à une vitesse qui diminue à mesure qu'il se rapproche du sol, puis qu'il se pose et coupe les moteurs.

Pour une voilure fixe, le décollage automatique nécessite au préalable de déterminer la direction du vent et d'orienter le drone en conséquence. Le pilote automatique met en route le moteur dès que la vitesse par rapport à l'air dépasse une donnée prescrite (par exemple après un lancer à la main ou un catapultage) et gère un angle de montée idéal. Atterrir signifie réaliser un circuit pour présenter le drone face au vent.

Ces modes déchargent le télépilote des phases les plus critiques du vol.

Circuit d'atterrissage

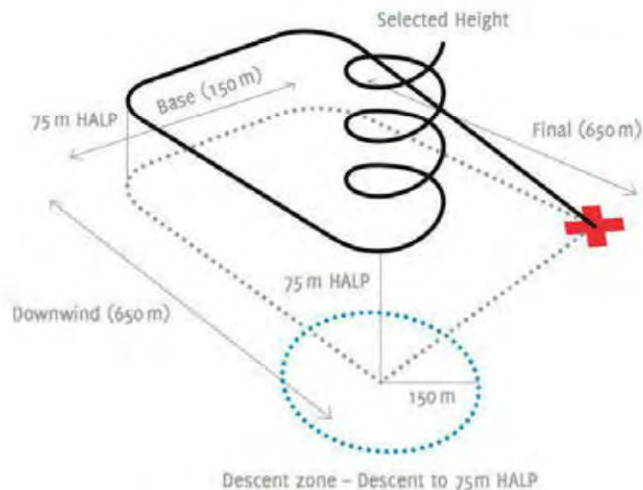


Figure 4-4. Circuit d'atterrissage du Trimble X100

Le drone revient à son point de départ, descend en spirales à 75 m, puis s'écarte en vent arrière sur 650 m, effectue un virage puis une étape de base de 150 m, exécute un dernier virage, revient en finale en descente et se pose à 15 m du point désiré.

EN MODE DE NAVIGATION AUTOMATIQUE

Ce mode est celui qui intéresse le plus les professionnels, car il permet d'exécuter un vol préprogrammé.

En quoi consiste un vol préprogrammé ?

Un vol préprogrammé consiste à atteindre un ou une série de points de passage (appelés parfois WP pour *Way Points*) : ces points sont déterminés par leurs coordonnées géographiques (altitude et longitude) et hauteur. La vitesse de vol entre les WP et les actions à mener à l'atteinte de chaque WP sont paramétrables. On peut par exemple définir une attente dont la durée est à déterminer, ou une action de la charge utile telle que prendre une photo. Le programme est téléchargé dans l'autopilote généralement avant le décollage, mais certains systèmes acceptent des téléchargements quand le drone est déjà en l'air. Ensuite, le télépilote peut l'exécuter à tout moment au démarrage ou après une phase de vol manuel.

Il est possible de spécifier les coordonnées de chaque WP (*Way Point*) manuellement dans un tableau, mais il est beaucoup plus facile d'utiliser les plans de vol type proposés par les logiciels. Voyons quelques exemples de plan de vol automatique.

Réaliser une mosaïque d'un terrain

Imaginons que vous souhaitiez réaliser une photo aérienne verticale d'un terrain trop grand pour être pris en un seul cliché à la hauteur de vol du drone. Une solution consiste à prendre des photos verticales de différentes parties du terrain avec un taux de recouvrement constant, puis de les assembler ensuite. Pour cela, le drone devra voler en lignes droites parallèles et effectuer des demi-tours en sortie de terrain ; durant son vol, le drone prendra des photos lorsqu'il atteindra des WP déterminés à l'avance.

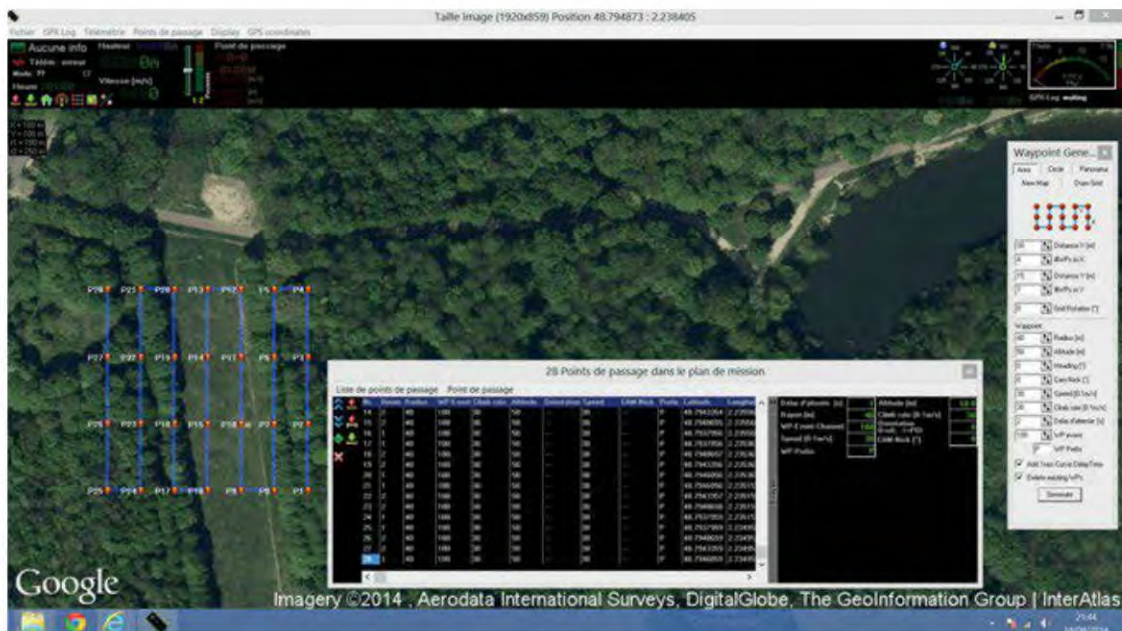


Figure 4-5. Préparation d'un vol mosaïque au-dessus d'un terrain Est-Ouest en 30 WP avec le logiciel Mikroppter Tool. Le plan de vol sous forme de lacet apparaît en bleu à gauche. Les coordonnées de chaque point de passage sont rassemblées sur le tableau du bas.

Il suffit de spécifier dans le logiciel le point de départ, la distance entre les points de passage, et leur nombre. Le logiciel fournit un plan type. Pour les voilures tournantes, un temps d'attente peut être spécifié entre chaque WP.

Les logiciels de drones destinés à la photogrammétrie simplifient encore la création du plan de vol. Dans Quickfield de Gatewing, il suffit de dessiner un rectangle, un point de décollage et d'atterrissage, une hauteur, la direction du vent et le taux de recouvrement (en %) demandé entre les photos et le logiciel fait le reste.

Le télépilote n'a plus qu'à simuler le vol.

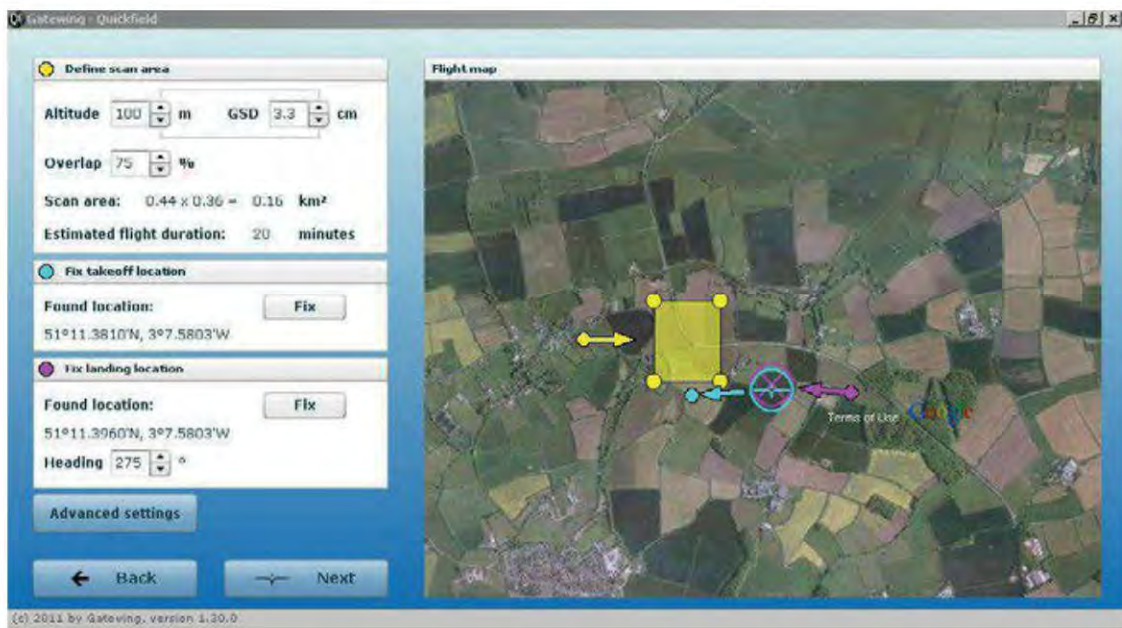


Figure 4-6. Logiciel Quickfield de Gatewing. Le rectangle jaune est le terrain à scanner, les flèches désignent la direction de décollage et d'atterrissage, tandis que le tableau blanc résume les paramètres du vol.



Figure 4-7. Plan de vol obtenu. Les points roses sont les WP (reliés entre eux par des lignes jaunes) que le drone doit suivre.

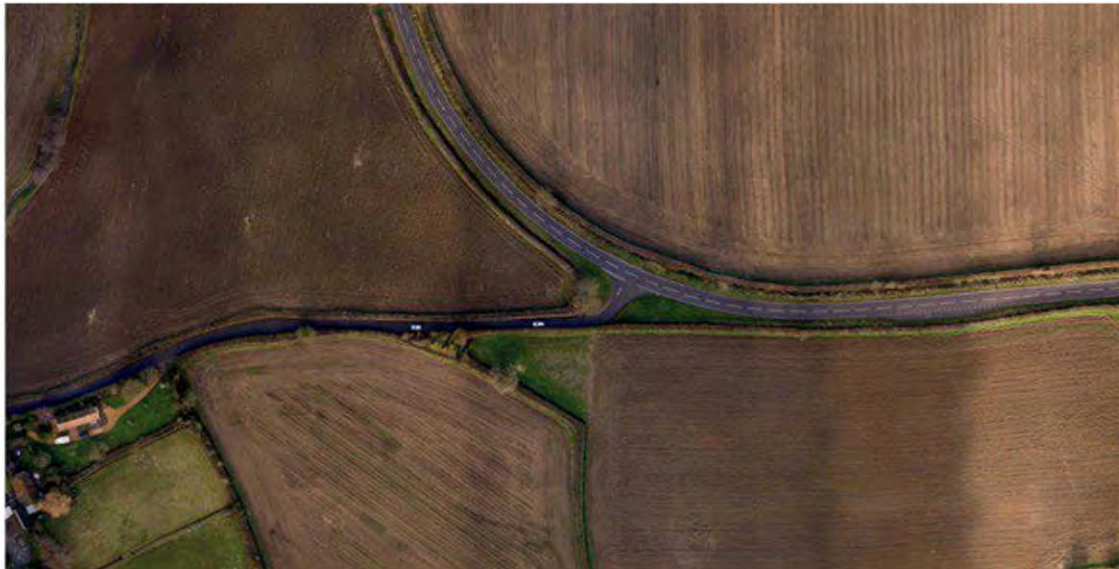


Figure 4-8. Résultat : une image géoréférencée très haute définition en 220 photos assemblées

Prendre des photos de toutes les faces d'une maison

Imaginons que vous vouliez prendre des photos de votre maison sous tous les angles. Pour le vol du drone, cela revient à désigner la maison comme le centre d'un cercle et à faire tourner le drone autour, en gardant l'appareil photo toujours pointé vers le centre. Le logiciel permet de créer un cercle autour d'un point d'intérêt, d'en spécifier le rayon, l'altitude du point d'intérêt et du vol, ainsi que le nombre de WP. L'angle vertical de la caméra s'ajustera automatiquement à la différence d'altitude entre l'objet d'intérêt et le drone (figure 4-8).

Si vous voulez prendre des photos horizontales d'une tour et sur toute sa hauteur, une variante du vol circulaire consiste à effectuer une série de cercles à des hauteurs différentes en gardant l'appareil photo horizontal face à la tour. Il suffit d'ajouter, après la création d'un premier cercle, un nombre de cercles superposés, et une hauteur de séparation.

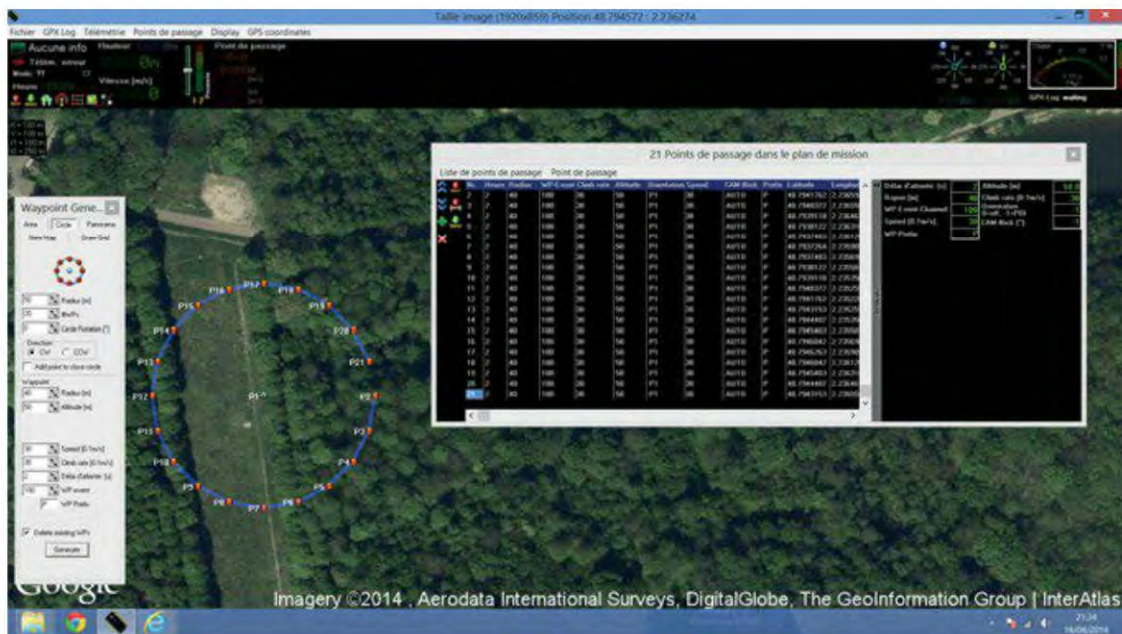


Figure 4-9. Plan de vol circulaire en 10 WP autour d'un centre d'intérêt

Réaliser un panorama

Vous avez sans doute déjà utilisé la fonction panorama de votre appareil photo : cela consiste à prendre des clichés à partir du même point dans des directions différentes avec un recouvrement. Un drone peut très bien être utilisé. En vol stationnaire, il pivote sur son axe central en prenant des photos à intervalles réguliers. Le logiciel vous aide : il suffit de spécifier le WP du vol stationnaire et le nombre de photos à prendre.

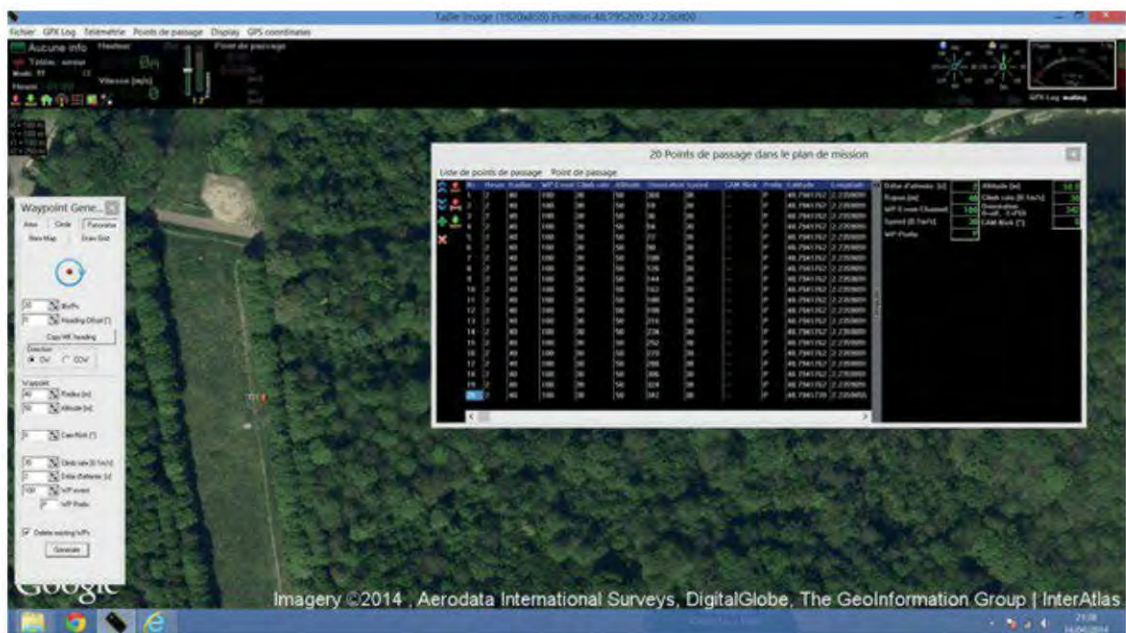


Figure 4-10. « 20 photos » signifie une photo tous les 18°, recouvrement très suffisant.



Figure 4-11. Panorama réalisé à 50 m du sol en 20 photos des bois de Meudon

AUTRES MODES DE VOL

Nous avons évoqué les modes principaux ; il existe cependant d'autres modes de vol plus anecdotiques.

Follow Me

Le drone suit le signal émis par un émetteur au sol équipé d'un GPS. Il peut ainsi suivre une voiture, un bateau, une personne au sol, en automatique. Attention, ce mode n'est pas sans risque pour les personnes au sol.

Vol en mode acrobatique

Le drone peut enchaîner des boucles, renversement, tonneaux et autres figures acrobatiques préprogrammées. Il peut ainsi faire son show, seul ou en meute. À tester bien sûr sans charge utile et à une altitude suffisante.

Un scénario de vol particulier : le vol indoor

Il peut être nécessaire de faire voler un drone à l'intérieur d'un bâtiment, par exemple pour filmer une salle de spectacle ou inspecter une installation industrielle. Le pilotage est alors très délicat pour plusieurs raisons : proximité d'obstacles, perturbations magnétiques dues à la présence d'appareils électriques, courants d'air, dont ceux provoqués par le flux d'air des hélices, et surtout un signal GPS dégradé ou nul. Il est par conséquent conseillé de doter les hélices de protections. Depuis 2015 apparaissent les premiers systèmes de détection d'obstacles vraiment efficaces, à la manière des radars de recul de voiture. En empêchant le drone de s'approcher trop près d'un mur, ils sauvent de nombreuses hélices.

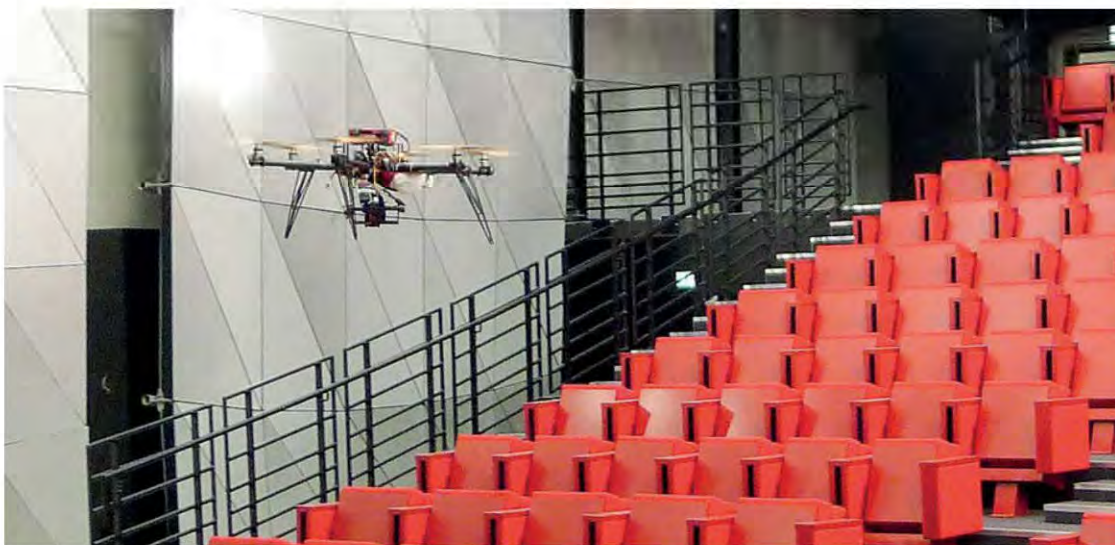


Figure 4-12. Vol indoor pour filmer une salle de spectacle

SIMULATION DU VOL

Vous avez préparé un vol, mais vous n'êtes pas sûr que le drone ait assez d'autonomie pour le réaliser d'une traite. Vous voulez aussi vous assurer du respect de distance minimale aux obstacles et prévenir un éloignement excessif. Pour cela, il faut simuler le vol. Le logiciel fait apparaître le cheminement du drone le long du plan de vol programmé en tenant compte des paramètres de performance tels que le rayon de virage, la vitesse ascensionnelle, la tenue au vent, la consommation électrique, etc. Cette simulation est une véritable assurance anti-crash, notamment pour les voilures fixes, qui ont des rayons de virages assez larges.

Si le drone ne peut réaliser l'ensemble de la mission en un seul vol, celle-ci peut être scindée en une série de vols adjacents : ainsi, une société en Indonésie arrive à réaliser une cartographie de 25 km² en 25 vols d'1 km² chacun, pour le comptage de palmiers.

Dans sa version la plus raffinée, le vol est entièrement automatique du début jusqu'à la fin en séquences successives : le drone décolle automatiquement, exécute un vol préprogrammé puis atterrit automatiquement. Sinon, le décollage peut être effectué manuellement, à la suite de quoi le vol automatique est enclenché, puis le pilote reprend le contrôle pour l'atterrissage.

CONTRÔLE DU VOL ET DE LA CHARGE UTILE

Une fois le drone en vol, l'interface graphique du logiciel fournit une lecture en temps réel de trois types de paramètres.



Figure 4-13. Simulation d'un vol à 80 km/h et 150 m d'altitude, avec virage de 30° d'inclinaison

- La zone centrale asservit la trajectoire en temps réel du drone sur une image satellite de type Google Earth, ce qui permet de vérifier que le plan de vol est bien suivi.
- Une deuxième zone présente les paramètres de vol (vitesse, cap, altitude, état de la batterie...) en temps réel sous une forme inspirée d'un tableau de bord d'avion avec cadrans et horizons artificiels.

- Une troisième zone fait apparaître des boutons d'action à cliquer ou des champs numériques à remplir pour modifier le vol : changement d'altitude, mise en attente, interruption du vol, retour à la maison... Certaines actions irréversibles (telles qu'une interruption du vol) doivent être confirmées pour être exécutées.

Il est possible aussi de télépiloter à l'écran, sans plan établi, en déplaçant à la souris ou sur un écran tactile, un WP que le drone va toujours suivre. Une fois le WP atteint, il se met en attente jusqu'à la nouvelle modification du WP.

Le nombre de photos, l'heure, le lieu, l'orientation, l'emprise des photos au sol, etc., peuvent être représentés sur la station de contrôle.

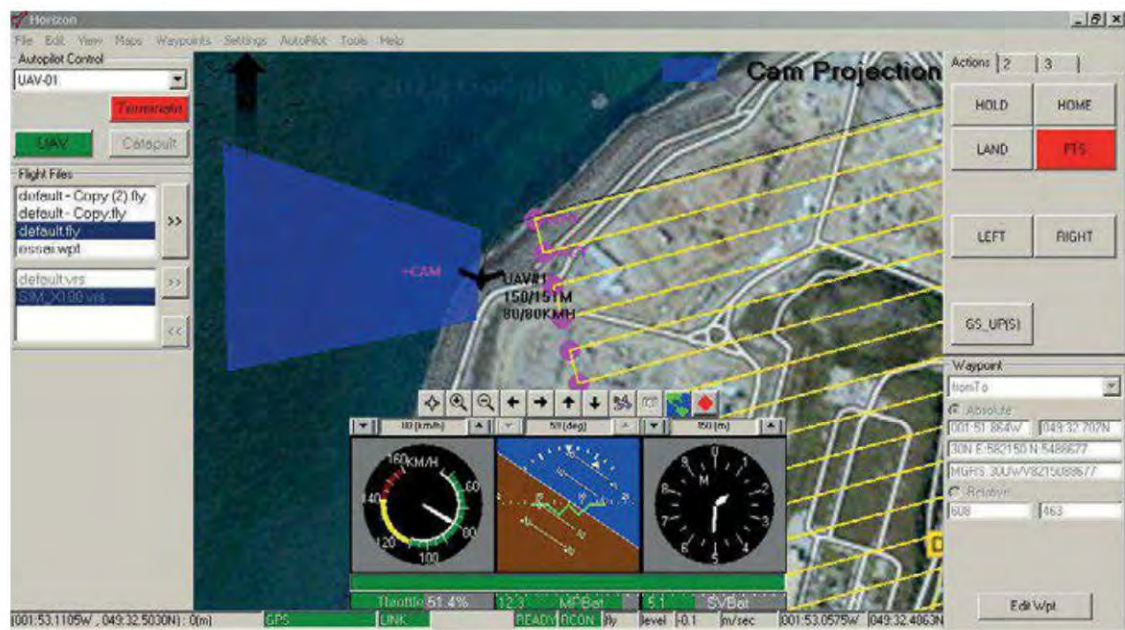


Figure 4-14. Le trapèze bleu symbolise l'emprise au sol de la photo prise d'un avion en virage à gauche.



Figure 4-15. En vol palier, à 150 m de hauteur, l'emprise de la photo au sol couvre environ 1 hectare, sous la forme d'un rectangle.

Avec tous ces automatismes, le télépilote supervise le vol plutôt qu'il ne pilote. Il surveille des données vitales.

Éventuelles coupures de liaisons de contrôle ou de GPS

La navigation automatique peut impliquer que le drone passe derrière un obstacle (un arbre, une colline) pendant un temps court, donc que le lien radio soit interrompu à cette occasion. Le drone peut être programmé pour tolérer cette interruption pendant une durée au-delà de laquelle la fonction RTH s'enclenche.

Tension de la batterie de vol

Les drones électriques ont une autonomie limitée (en moyenne moins de 15 min pour un multirotor avec charge utile et moins d'1 h pour une voilure fixe). Sitôt en vol, la tension de la batterie baisse : le vol doit obligatoirement être interrompu avant une décharge complète, sous peine de perdre la batterie (qui se met à chauffer et devient inutilisable), le drone ou les deux à la fois. C'est en phase de montée et dans une moindre mesure, lors des déplacements, que la batterie est la plus sollicitée. Un drone hexacoptère équipé d'une batterie de 16 V au démarrage peut ne plus afficher que 14 V après une montée à 100 m en vol stationnaire, puis se reprendre un peu à 14,5 V, avant de diminuer progressivement. Sur une durée de vol totale de 15 min, la durée utile (celle pendant lequel le télépilote prend des photos) est réduite du temps de montée et d'atterrissage, soit peut-être seulement 10 min. Il n'y a vraiment pas de temps à perdre pour trouver un ou plusieurs angles de vue, cadrer et déclencher l'obturateur. La quantité de travail est telle que l'on perd vite la notion du temps ! La plupart des radios sont heureusement équipées d'un chronomètre se déclenchant à la mise en route des moteurs et actionnant une alarme au bout d'une durée déterminée. Prendre quelques instants avant le décollage pour se préparer mentalement aux manœuvres qui vont suivre peut éviter les hésitations quand le compteur tourne. Un télépilote expérimenté optimisera son temps en pointant, en toutes phases de vol, la charge utile vers le point d'intérêt à photographier, par exemple par un éloignement initial en marche arrière. Il effectuera aussi des trajectoires tendues afin « d'éviter les détours ».

Bien sûr, si vous pouvez travailler en équipe avec un cadreur disposant du retour vidéo et du contrôle 3 axes de la charge utile (avec une autre télécommande), vous gagnerez en efficacité. Vérifiez toutefois auparavant si le surpoids d'une telle installation de bord est raisonnable : pour un drone, le poids est l'ennemi de l'autonomie – voire de la sécurité – et il est impératif de se débarrasser de tout accessoire embarqué superflu à une mission.

Le télépilote doit se garder une marge de temps pour faire face à des imprévus et se souvenir que l'autonomie est réduite par vent fort, du fait que les moteurs sont plus sollicités en vol stationnaire ou en raison d'un temps de parcours plus long. En altitude, le vent est toujours plus fort qu'au sol (c'est la raison pour laquelle le mât des éoliennes est le plus long possible). Enfin, le froid diminue la performance de la batterie. Il ne faut pas hésiter à atterrir, quitte à compléter la mission par un vol supplémentaire, plutôt que de vouloir tout faire en un seul vol.

Bon suivi du plan de vol et séparation avec d'autres aéronefs

En mode automatique, le télépilote doit s'assurer que le plan de vol est bien respecté en gardant un œil sur le logiciel de navigation cartographique. Si le drone s'en écarte, le pilote

doit interrompre le vol et reprendre un mode manuel. Mais l'erreur fatale serait de ne regarder que l'écran, sans vérifier de visu que les manœuvres sont bien exécutées.

Il faut aussi rester vigilant à tout risque de conflit avec un éventuel aéronef piloté : la réglementation oblige les drones à voler à moins de 500 pieds (150 m) pour ne pas rentrer en conflit avec la majorité des aéronefs, qui doivent voler à plus de 500 pieds. Cependant il est possible de rencontrer à faible hauteur des hélicoptères, planeurs, parapentes, montgolfières... Il est obligatoire pour cela de se faire aider par un « observateur visuel ».

Risques du vol automatique

Confier le contrôle du vol à un autopilote, c'est prendre quelques risques. Voyons lesquels.

Non-détection de problèmes mécaniques

Si, en vol manuel, le drone a un comportement anormal, en raison d'une gouverne ou un rotor défectueux, le télépilote va tout de suite s'en rendre compte et faire poser son drone. Il sera moins évident de détecter ce défaut en vol automatique, parce qu'il risque d'être masqué par la fonction de stabilisation de l'autopilote, jusqu'à ce qu'il soit trop tard. C'est pourquoi certaines check-lists imposent une phase de vol manuel avant d'enclencher le vol automatique.

Erreurs de capteurs

Prenons un exemple : le maintien d'altitude dépend des mesures de pression atmosphérique, donc des lignes isobares. Ces dernières peuvent varier pendant le vol, en raison d'un changement de pression. Pour une voilure fixe, cela se traduit généralement par un manque de précision à l'atterrissage : le drone se pose 15 m avant ou après le point d'atterrissage choisi.

Coupure du lien GPS

La plupart des modes nécessitent un signal GPS. Sa qualité peut être compromise à proximité d'obstacles et de relief (fond de vallée). Le drone peut recevoir des données erronées dues aux multitrajets du signal : le drone reçoit à la fois le signal direct des satellites et le signal réfléchi par des obstacles. Pendant les temps de coupure, le drone se met à dériver, puis il reprend la navigation au rétablissement du signal.

Non-détection d'obstacles

Le drone est un robot aveugle, tant qu'il n'est pas doté de la faculté de « voir et éviter » ou « sentir et éviter ». En son absence, le drone continue son vol, sans être inquiété, jusqu'à heurter une montagne, un oiseau, un autre aéronef ou se planter dans le sol.

Données d'entrées erronées

Le vol dépend aussi des données entrées : plan de vol, coordonnées géographique des lieux, altitude. L'altitude des lieux est-elle correcte ? La carte Google Earth prend-elle en compte la nouvelle topographie des lieux ? On sait que dans certaines régions reculées, les cartes sont mises à jour au mieux tous les dix ans. Les topographes vous diront que ces cartes peuvent être imprécises par endroits de plusieurs dizaines de mètres. Google Earth décline

toute responsabilité et stipule que ses cartes ne sont pas destinées à la conduite de véhicule quels qu'ils soient. Or la plupart des drones les utilisent ! Pire, le télépilote a-t-il fait exécuter, par mégarde, le plan de vol de la mission précédente située à quelques centaines de kilomètres ? Si c'est le cas, le drone risque d'être vite perdu de vue...

Diminution de la vigilance

De même que le public d'un meeting aérien peut se lasser d'un vol automatique, le télépilote peut relâcher sa vigilance. Cela se traduit par plus de latence à reprendre la main en cas de problème.

Les modes de vols automatiques sont donc une aide précieuse, voire indispensable pour certains travaux, mais le télépilote ne doit pas se reposer entièrement dessus. Il doit garder une attitude interrogative, suivre rigoureusement des check-lists comprenant la vérification du bon état du drone et des données d'entrée. Enfin, le télépilote doit observer l'environnement et agir vite en cas d'imprévu.

Après la mission, il pourra toujours analyser les paramètres de vol.

Analyse des paramètres de vol

L'enregistrement des mesures des capteurs de bord, qui s'effectue généralement sur une carte SD, permet une analyse a posteriori. Voyons quelques exemples.

ANALYSE DES TRAJECTOIRES

La trajectoire du vol sous forme d'un fichier .kml est lisible sur Google Earth en 3D.



Figure 4-16. Trajectoires très régulières de la voilure fixe Trimble X100 lors du relevé topographique du virage

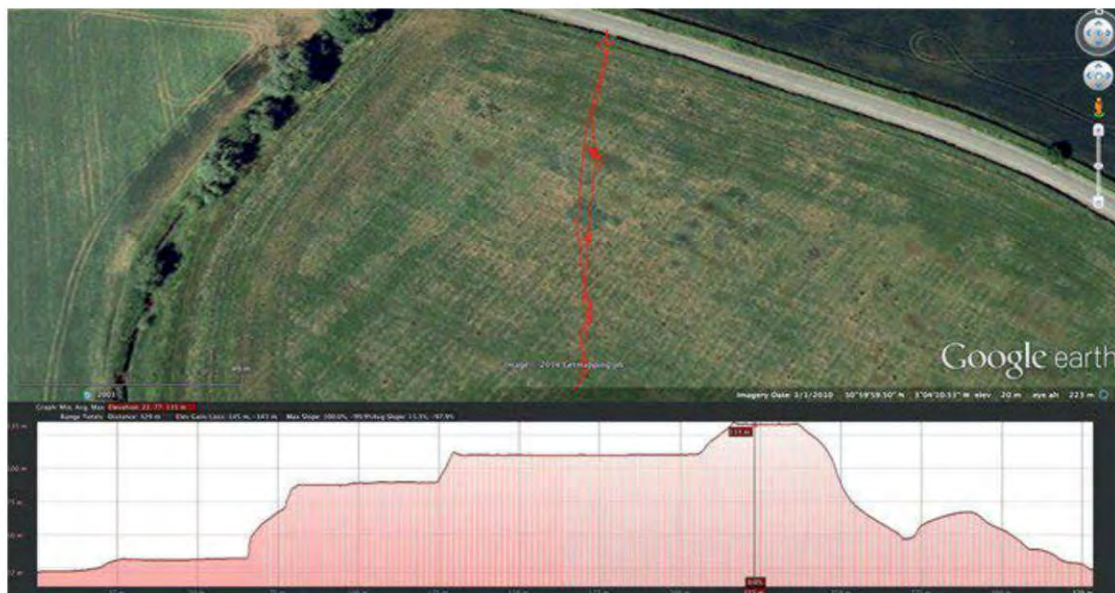


Figure 4-17. Trajectoire de vol d'un hexacoptère Cinestar6 : une montée à 100 m de hauteur avec des pauses à 40 et 80 m

Fonctions de Google Earth

Google Earth donne une représentation graphique de la distance et de l'altitude dans le temps avec la fonction Édition/Afficher le profil d'élévation.

ANALYSE D'AUTRES CAPTEURS

L'analyse des données de vol sert tout au long de la vie du drone :

- pour les réglages, aux premières mises en route ;
- pour certaines applications, les données de vol peuvent être corrélées avec les données de la charge utile ; par exemple, des photos « bancales » peuvent être redressées en corrélant les données numériques qu'elles comportent avec l'attitude de l'avion sur ces axes au moment où la photo a été prise. Les photos peuvent être géoréférencées grâce à la position GPS du drone ;
- pour comprendre un défaut de comportement, un crash, etc., une mission peut être rejouée à l'écran ; il est aussi possible d'effectuer des arrêts sur image et des retours en arrière ;
- pour préparer une mission ultérieure, un plan de vol réalisé peut être une donnée d'entrée pour une nouvelle mission, par exemple prendre des photos d'un même lieu à des dates différentes.

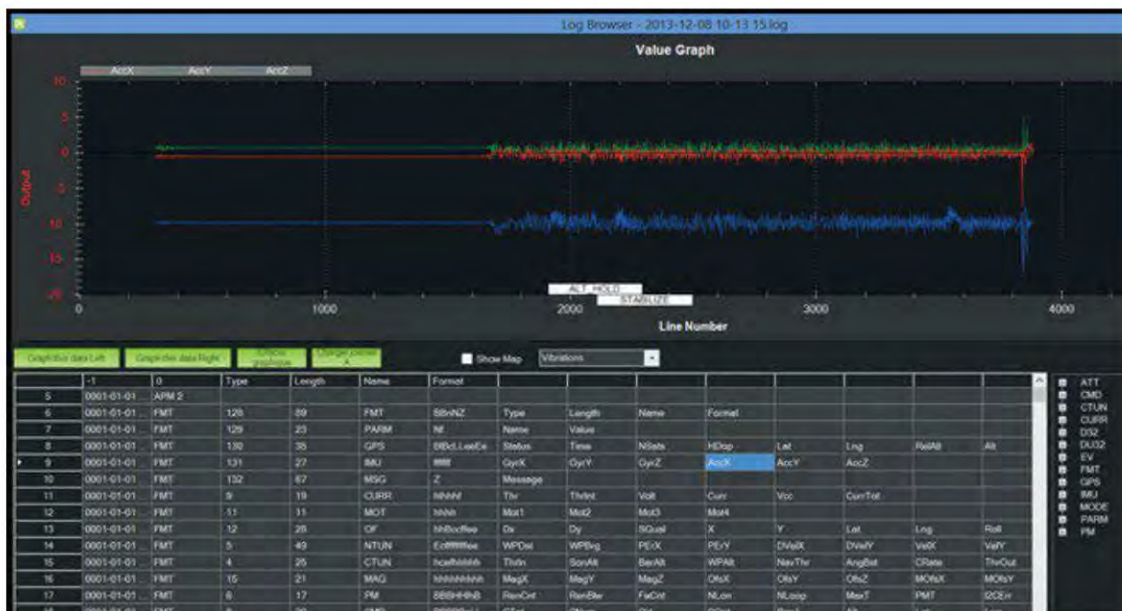


Figure 4-18. Analyse des vibrations en vol d'un quad Arducopter. Avec le temps en abscisse, les courbes rouge et verte représentent les vibrations horizontales (axes X et Y), tandis que la bleue traduit les vibrations verticales. Remarquez la grosse vibration à l'atterrissage.

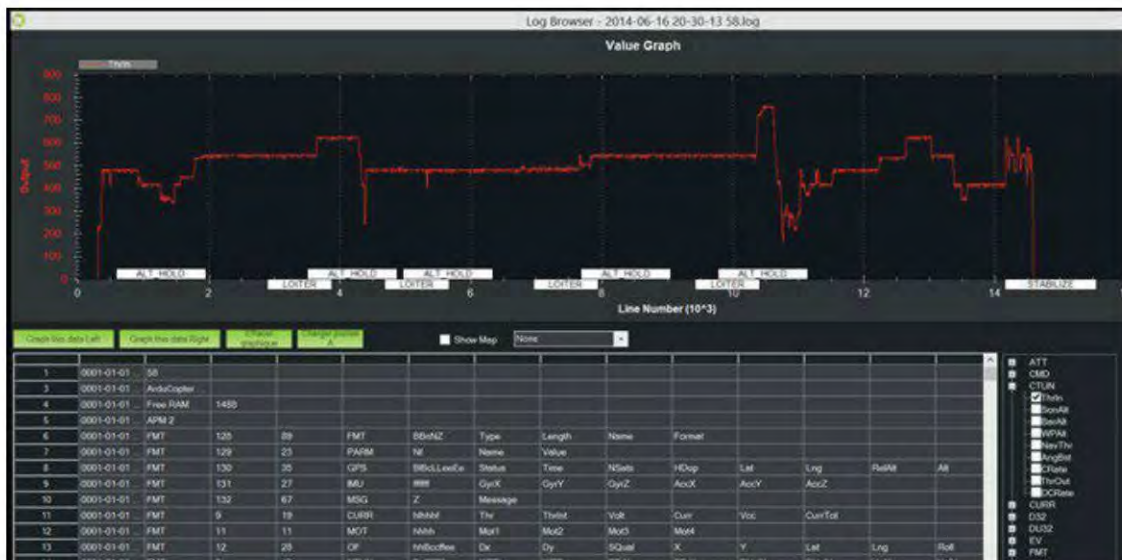


Figure 4-19. Analyse du niveau des gaz pendant un vol stationnaire, afin de vérifier que le quad n'est pas sous ou surmotorisé. 40 à 60 % de puissance est correct.

À QUOI SERT UN DRONE ?

« Quand un homme songe à son passé, il baisse les yeux vers la terre, et lorsqu'il songe à son futur, il les lève vers le ciel. »

Aristote

À quoi servent les drones ? Principalement à produire des photos et des vidéos de communication à couper le souffle. À titre strictement professionnel, les drones servent aussi à surveiller en direct et à distance une situation d'urgence ou dangereuse. De plus, les drones sont utiles pour les applications topographiques (cartes, courbes de niveau et modèles numériques de surface). Il suffit d'adapter la charge utile pour que d'autres secteurs porteurs s'y intéressent aussi : agriculture et environnement notamment. Le marché explosera vraiment quand les industriels l'utiliseront quotidiennement pour l'inspection d'ouvrages. Au-delà de ces usages courants, les utilisations possibles des drones sont sans limites. L'objet de ce chapitre n'est pas de toutes les recenser, mais de passer au crible les principales.

Applications médias

L'histoire du drone civil a commencé avec des photos et vidéos de communication. Cette application domine d'ailleurs toujours le marché.

PHOTOGRAPHIE AÉRIENNE

La photographie aérienne est l'application la plus simple. Une vue élevée permet aux aspirants Yann Arthus-Bertrand de situer un sujet dans son environnement. Ce type de photos constitue un solide argument pour présenter une grande propriété, un chantier ou un parc sous les meilleurs angles. C'est pourquoi les agences immobilières, les publicitaires, les professionnels du tourisme et les journalistes s'y intéressent de près. Les particuliers ne sont pas en reste. Quel matériel utiliser, comment l'utiliser et pour quels résultats ?

Quel matériel utiliser ?

Pour qu'une photo soit réussie, il faut que le sujet soit bien cadré. C'est une mission taillée sur mesure pour les drones capables de vol stationnaire, comme les multirotors.



Figure 5-1. Combe Wick, village dans le sud-ouest de l'Angleterre, photographié à 150 m de hauteur avec une GoPro

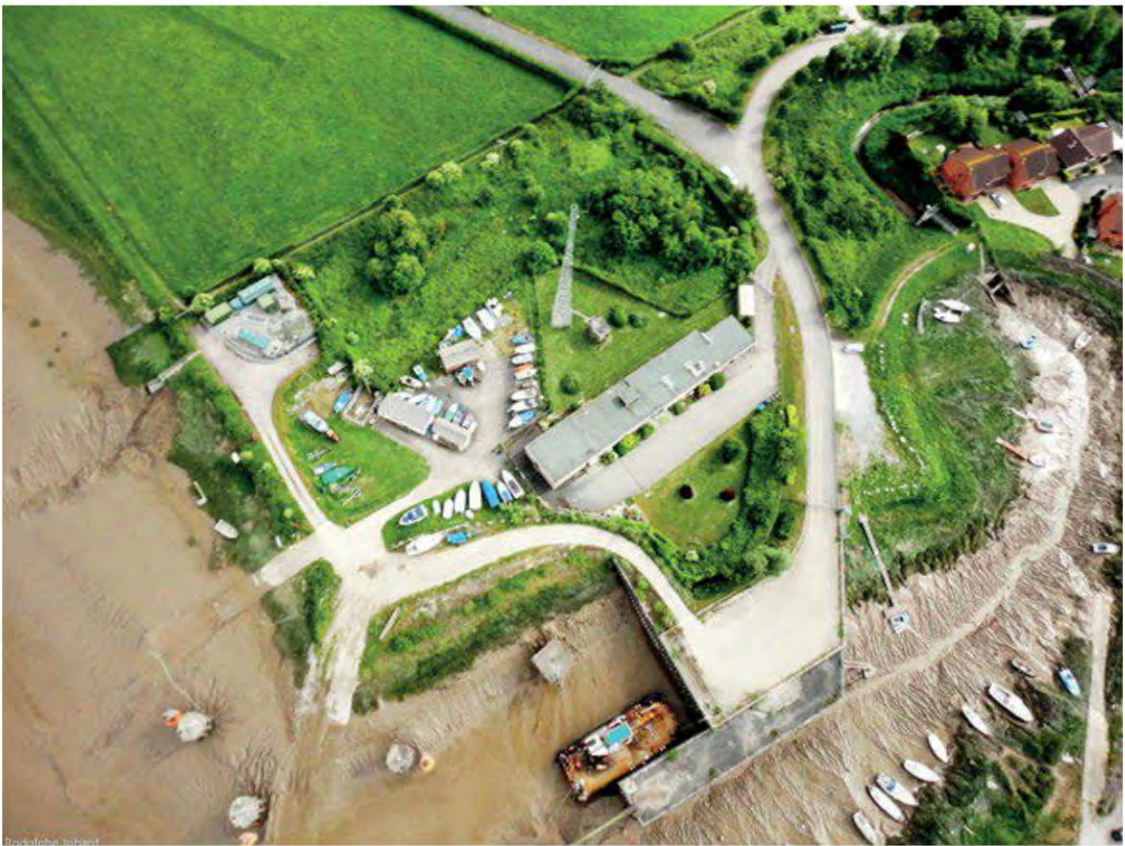


Figure 5-2. Autre photo prise pendant le même vol, sans optique fish-eye : l'impression d'altitude est diminuée.

La nacelle portant l'appareil photo doit être protégée des vibrations autant que possible. Si le drone donne au photographe une liberté inédite, le déclenchement à distance présente l'inconvénient de devoir régler l'appareil photo avant le décollage. Un travail d'amélioration des photos s'avère ensuite souvent nécessaire. Comme pour toute photo de paysage, l'optique à privilégier est le grand-angle (moins de 25 mm). Plus la focale est courte et plus l'impression d'altitude est renforcée. Une lentille *fish-eye* (3 mm), que l'on retrouve sur une GoPro, donne à l'horizon une forme ronde, comme si la photo était prise de l'espace ! C'est l'appareil photo le plus répandu chez les dronistes en raison de son rapport performance/poids exceptionnel.

Style de photo : verticale, oblique à 45°, ou sur l'horizon

Un simple mouvement sur une manette de la télécommande et la nacelle bouge de haut en bas. Cette liberté permet de prendre des photos dont la verticalité est adaptée à chaque situation. Pour l'exercice, prenons 0° comme axe vertical et 90° comme axe horizontal.

Photos verticales

Une photo verticale prise avec une optique grand-angle, à la hauteur maximale autorisée de 150 m, a une emprise au sol de moins de 2 hectares. Elle ne convient donc qu'aux sujets de taille relativement modeste. Le cadrage doit être précis et ne peut être obtenu qu'en amenant le drone au centre du sujet, puis en le faisant pivoter sur son axe vertical pour faire coïncider les formes avec le format de l'appareil. Ces manœuvres sont coûteuses en temps de vol. Le relief s'aplatit et les formes de la nature deviennent abstraites. Disposer d'éléments reconnaissables (voiture, arbre, bateau...) permet d'estimer l'échelle.



Figure 5-3. Excavations d'un chantier dont l'eau stagnante produit une couleur turquoise. En bas à droite, le chemin et la voiture donnent l'échelle, à 150 m de hauteur.



Figure 5-4. Construction d'une petite maison, chantier pris à 50 m de hauteur à la verticale exacte

Si le survol du sujet n'est pas autorisé, en raison par exemple de risques aux personnes ou aux biens, ou si le sujet est trop grand pour rentrer entièrement dans le format, il faut en faire le tour et prendre des images obliques.

En vue oblique à 45°



Figure 5-5. Chantier de construction d'une centrale au gaz, photographié à 100 m de hauteur. Il faut monter au-dessus des grues pour montrer que les photos n'ont pas été prises depuis l'une d'elles !

Un angle à 45° donne de la perspective au sujet, comme si vous le contempriez depuis votre balcon en vous penchant un peu. L'emprise de la photo au sol s'élargit à près d'une dizaine d'hectares au-delà de 100 m de hauteur. Vous comprendrez aisément que pour avoir un angle de 45° à 100 m de hauteur, il faut 100 m de recul.

Vue à 70-80°, montrant l'horizon

En regardant à 70° ou 80°, la photo contient l'horizon, ce qui aide à se repérer : le résultat rappelle alors un paysage vu depuis un hublot. Sur terrain plat, la vue porte à une dizaine de kilomètres. L'horizon pouvant être terni, voire disparaître sous la brume, ce type de photo est à adopter de préférence par temps sec.

Conseil : bien cadrer le sujet

Attention à ne pas montrer trop de ciel (un tiers maximum) et surtout pas les rotors ! Cela peut arriver quand le drone prend une forte inclinaison, pour contrer un vent venant de face, ou s'il avance. Il faut avoir un recul suffisant, de 200 m au moins.

Compte tenu de l'immensité de l'emprise au sol, le sujet peut se perdre dans le reste du paysage. Le marquer sur la photo, avec un logiciel de dessin, permet de le repérer.



Figure 5-6. Vue à 70° : les terrains à bâtir sont identifiables par leurs contours tracés en rouge.

Quand photographier et comment régler l'appareil photo ?

En hiver, le soleil est bas sur l'horizon, le temps humide et la nature est terne. C'est donc la période la moins propice aux photos aériennes. Quelle que soit la saison, il faut attendre que le soleil soit assez haut. Les puristes diront que le meilleur moment se situe entre 10 et 16 h.

Une fois le drone en l'air, il est trop tard pour paramétrer l'appareil photo. Le défaut fréquent est le flou de bougé. Au lieu d'être confortablement installé sur un trépied, le boîtier est en effet soumis aux mouvements et aux vibrations du drone. Il faut donc procéder à des essais et adopter la vitesse d'obturation la plus lente possible, de façon à ce que la photo soit lumineuse, sans que le flou de bougé n'apparaisse. C'est généralement 1/400^e au minimum pour une optique grand-angle et 1/2 000^e avec le zoom, en mode S (pour *Shutter Speed priority*). Compte tenu de la distance au sol, il n'y a pas besoin de profondeur de champ ; l'appareil fera la mise au point sur l'infini.

Il est conseillé aussi d'utiliser un filtre polarisant, car il ravive les couleurs du ciel et enlève une bonne partie des reflets sur l'eau.

Le format .raw contient plus d'informations que le format compressé .jpeg. Ce format professionnel est donc à privilégier pour les images aériennes parce qu'elles nécessitent souvent des retouches. Personnellement, je prends les photos simultanément dans les deux formats, afin de profiter du meilleur des deux mondes : la rapidité du format .jpeg et la flexibilité du format .raw.

Ultime précaution avant chaque vol : nettoyer correctement la lentille, pour éviter qu'une goutte de rosée récupérée au dernier atterrissage ou que des poussières viennent gâcher toute votre série. Idéalement, il faut disposer d'un plan de travail sur place, comme une table de camping, histoire de tout garder au propre.

Les conseils de l'expert

- Préférer la prise de photo en milieu de journée en raison de la luminosité.
- Limiter les flous en choisissant une vitesse d'obturation rapide.
- Un filtre polarisant permet de raviver les couleurs.
- Privilégier le format .jpeg pour sa rapidité et le format .raw pour sa flexibilité.
- Nettoyer correctement la lentille.

Faire de l'ombre et des nuages des alliés



Figure 5-7. Rares sont les jours de ciel bleu sur la côte anglaise. Heureusement, une trouée éphémère illumine ce chantier.

Par temps ensoleillé, les ombres au sol accroissent le contraste et facilitent la reconnaissance des formes. En revanche, le contre-jour gâche complètement une photo aérienne. Si la prise de vue en direction du soleil est nécessaire, il vaut mieux attendre que passent des nuages.

Pourtant, ces derniers ne facilitent pas toujours la tâche : l'ombre de nuages détachés provoque parfois un patchwork de zones sombres et de zones claires qui doivent être atténuées en post-production. On peut toutefois profiter d'une trouée de lumière dans un ciel nuageux pour déclencher la photo quand le sujet est illuminé par ce projecteur naturel.

Édition des photos en postproduction

Le photographe ne dispose que de quelques minutes pour stabiliser le drone, cadrer et déclencher. Comme le retour vidéo peut être, par moments, médiocre en raison d'interférences, il ne faut pas s'attendre à réussir toutes les photos. Il est préférable d'en prendre un grand nombre pour multiplier les chances d'en avoir quelques-unes excellentes. La sélection doit ensuite être améliorée avec un logiciel du type Adobe Lightroom.

L'horizon est rarement droit. Ce défaut est vite corrigé en utilisant la fonction Angle de Lightroom, mais au détriment des coins de la photo.

Et si le sujet est légèrement mal centré, il sera aisé d'y remédier en rognant les bords.



Figure 5-8. Un logiciel d'édition de photos comme Lightroom permet de retoucher facilement ses meilleurs clichés.

Pour raviver les couleurs ternies par de la brume au loin, augmentez le contraste, saturez les couleurs et baissez un peu d'exposition en utilisant un filtre horizontal graduel : les détails jailliront.

VIDÉO

Les drones sont très agiles pour suivre en direct les skieurs de Sotchi et les coureurs du Tour de France ou monter et descendre le long de monuments. Après s'être fait la main avec des

photos, le télépilote aura sans doute envie de passer à la vidéo, pour profiter à plein du dynamisme de l'outil. Il est de toute façon recommandé d'avoir pris des vidéos dès les premiers vols, pour juger de la stabilisation de la nacelle et du niveau de vibration.

Stabiliser l'image

Sachez qu'il n'est vraiment pas facile de réaliser de belles vidéos. La première des raisons est que la caméra bouge tout le temps. Il y a deux moyens de compenser ses mouvements :

- à la source, grâce à une nacelle gyrostabilisée qui corrige les mouvements en temps réel. La course maximale et la vitesse de mouvement de la nacelle doivent être méticuleusement réglées : ni trop ni trop peu, ni trop lent ni trop rapide, et sans à-coups. Si l'on change de charge utile, il est souvent nécessaire de réitérer les réglages en raison de différence d'inertie ;
- en postproduction, grâce à une stabilisation électronique avec des logiciels comme iMovie (Apple) ou Adobe Premiere Pro, mais cela fait perdre en qualité et en taille d'image.

Surveillez par ailleurs la météo : un jour sans vent facilite la stabilisation.

Apprendre à cadrer un sujet en mouvement

Il est difficile, voire dangereux, de piloter à la fois le drone et la caméra (pointer, zoomer, dézoomer) : ce serait comme conduire une voiture et filmer simultanément. Idéalement, ces deux fonctions sont confiées à des personnes distinctes : le cadreur commande la caméra sur les trois axes et le zoom depuis sa propre télécommande ; le pilote, quant à lui, s'occupe du déroulement du vol et de l'état de la machine. Une excellente communication entre eux s'impose ; dans les faits, c'est le pilote qui obéit au cadreur et non l'inverse. Une autre possibilité est de réaliser des phases du vol en automatique. Le télépilote devient cadreur pendant cette phase, puis reprend sa fonction initiale. Le vol automatique doit être opéré à une distance suffisante de tout obstacle.

Vous découvrirez alors les joies et les vicissitudes du métier de cadreur. Comme il est délicat de pointer sur le sujet depuis un véhicule en mouvement ! La caméra doit en fait pointer dans la direction opposée à celle que prend le drone. Par exemple, au fur et à mesure que le drone s'élève, il faut progressivement pointer vers le bas pour continuer à garder le sujet au centre. En montant, le sujet sera vu d'un angle de plus en plus vertical, donc avec une emprise au sol diminuant. Quand le drone longe le sujet par la droite, la caméra doit pointer devant, puis du côté gauche et enfin vers l'arrière. Les 360° sont appréciés en aérien car ils permettent d'avoir une vue d'ensemble, mais à condition de le faire à vitesse lente et constante, en gardant l'horizon bien en vue, afin d'éviter de donner le tournis. La vidéo par drone nécessite de l'entraînement en zone dégagée, en prenant des repères au sol. Le zoom ne doit être utilisé que lorsque le drone est en stationnaire et stable. Pour donner un effet de vitesse, malgré celle relativement modeste d'un multirotor (moins de 50 km/h), il faut voler près du sujet ou voler bas et pointer la caméra vers le sol.

La couverture d'un événement sportif par des drones comporte un risque important pour la sécurité du public, qui ne doit pas être sous-estimé. En cas de défaillance, le drone doit pouvoir atterrir en urgence dans une zone vide. Lorsque les images ne sont pas destinées au direct, un montage des meilleurs plans avec insertion de commentaires audios, de textes ou de musiques donnent un aspect abouti plus professionnel.

Les drones deviennent, en tant qu'application média, un substitut :

- au mât télescopique, dont la hauteur est généralement limitée à 20 m et est statique – le mât est lourd à mettre en œuvre, d'où son attachement à un véhicule ;
- à l'hélicoptère (onéreux) ou l'ULM (qui ne peut voler bas ou en stationnaire).

La qualité des appareils photo et vidéo numériques est aujourd'hui telle qu'il est très difficile de deviner, à basse altitude, qui du drone ou de l'hélicoptère a pris les images.

Surveillance

Si le retour vidéo est un peu accessoire pour les applications médias, il est la raison d'être des applications de surveillance !

La surveillance d'une zone par drone consiste à en visionner les abords au moyen d'un flux vidéo, transmis en temps réel au sol : le drone agit comme un substitut à des jumelles déportées. Le but est de prendre des informations d'une situation d'urgence en évolution, par exemple un incendie, un accident, une prise d'otages... Cette application intéresse en premier lieu les acteurs institutionnels de la sécurité : police, gendarmerie, sécurité civile... mais aussi la SNCF pour lutter contre le vol de câbles le long des voies de chemins de fer, ou encore des organismes humanitaires pour lutter contre le braconnage d'espèces protégées dans les réserves naturelles... Les images peuvent être visionnées par les opérateurs sur site, ou bien être envoyées à distance dans un centre de commandement. Elles sont alors un outil d'aide à la décision : évaluation de la situation, prévision, coordination des moyens au sol.

DRONES DE SURVEILLANCE

Il s'agit des versions civiles des minidrones militaires. Pour la majorité des applications terrestres, un drone de surveillance doit être stationnaire au-dessus de la zone à surveiller : les voilures tournantes sont donc les plus appropriées. La surveillance requiert une permanence sur l'objectif que les minidrones civils électriques parviennent mal à assurer : ils ont une autonomie généralement inférieure à 30 min. Leur avantage est d'être peu bruyants, donc discrets. Des versions à moteur thermique portent l'autonomie au-delà d'une heure, comme le IT 180 d'Infotron. Ce drone complète les moyens robotiques du GIE Intra (organisme chargé d'assurer les premières réparations en cas d'accident nucléaire). Les applications de surveillance de frontière ou de côtes, qui nécessitent des vols longue distance, sont confiées à des drones à voilure fixe. Ils sont utilisés de plus en plus par des pays aux frontières étendues ou sensibles : Russie, Israël, Inde...

La charge utile d'un drone de surveillance est une caméra vidéo avec un zoom. La caméra est gyrostabilisée ou la vidéo est stabilisée électroniquement en quasi temps réel. L'image est souvent en noir et blanc pour gagner en contraste, surtout à basse luminosité. Une caméra infrarouge est parfois utilisée de nuit. Ce type de caméra chauffe et doit donc avoir un système de refroidissement adéquat pour maintenir la performance constante. Des logiciels d'aide à la surveillance désignent une cible (une personne, un véhicule), en mesurent

la direction, la distance et la localisation, puis la suivent automatiquement par pointage (*tracking*) ou si nécessaire en déplaçant le drone.



Figure 5-9. Pointage et suivi automatique d'un véhicule par drone

Les drones ont l'avantage de pouvoir aller dans des endroits où l'homme mettrait sa vie en danger, tout en lui envoyant les informations dont il a besoin. Ainsi, les pompiers des Landes testent un système de drones qui se positionnent au-dessus des feux de forêts et envoient des images de la ligne de feu en temps réel.

La caméra vidéo ou thermique peut être complétée par des capteurs de mesure de pollution radiologique ou chimique, permettant de couvrir toutes sortes de sinistres. En promenant les capteurs à différents endroits, la cartographie de la contamination est établie, en quasi temps réel. Une mosaïque de photos ou vidéos envoyées au sol permet d'obtenir une vue d'ensemble sans devoir attendre les quelques heures usuelles de traitement par photogrammétrie.

LIMITES DES DRONES CIVILS DE SURVEILLANCE

La surveillance par drone a un potentiel immense, mais elle reste pour l'instant à l'essai car elle présente encore des inconvénients importants.

- Les drones doivent être coordonnés avec les autres moyens aériens car ils peuvent gêner d'éventuels hélicoptères de secours sur une zone sinistrée.
- En raison de leur faible autonomie, ils doivent être mis en œuvre au plus près. Or les accès à la zone peuvent être bloqués en cas de tremblement de terre, de contamination, d'incendie, ce qui rallonge considérablement le temps d'acheminement par rapport aux hélicoptères grandeur nature. L'autonomie réduite des drones demeure leur principal

handicap, les empêchant pour l'instant d'assurer une permanence, sauf à disposer de toute une logistique de plusieurs appareils, coûteuse en hommes et en matériel.

- Ils ne peuvent voler par tous les temps : il faut donc attendre que les vents, peut-être à l'origine du sinistre, soient suffisamment tombés pour les déployer.
- La réglementation aéronautique s'applique de la même façon aux forces de sécurité comme aux autres usagers du ciel. Ceci interdit le survol de personnes, donc la surveillance de foules. Rappelons que la police anglaise avait eu la bonne idée d'acquérir quelques minidrones pour faciliter les poursuites. Hélas, les conditions trop restrictives d'emploi l'ont amenée à s'en débarrasser...

De nouvelles applications émergent comme la recherche de rescapés après un tremblement de terre, un naufrage ou une avalanche, éventuellement combinée avec le largage de produits de secours (vivres, médicament, bouées...). Verra-t-on un jour des drones saint-bernard ?

Agriculture et environnement

Les paysans n'ont pas la réputation d'aimer la nouveauté et la dépense. Pourtant, ils se mettent eux aussi aux drones : au dernier Salon de l'agriculture à Paris, ils ont fait le buzz sans conteste !

En agriculture, les drones sont utilisés pour :

- établir un diagnostic de l'état de la biomasse d'une parcelle ;
- épandre un produit.

MESURE DE LA SANTÉ D'UN CHAMP

Saviez-vous que le sol d'un champ n'est pas de qualité uniforme ? À certains endroits, il est pauvre et les plantes manquent de vigueur, tandis qu'à d'autres, il est de bonne qualité et les plantes prospèrent. Ceci se traduit par des différences de rendement très localisées que l'agriculteur compense par l'usage d'engrais. L'agriculture de précision utilisée dans les grandes exploitations céréalières permet aujourd'hui une distribution fine, par localisation GPS. Mais comment répartir les dosages dans le champ ? Jusqu'à présent, le diagnostic était établi par un prélèvement et l'analyse en laboratoire de quelques échantillons de plantes pris ici et là. Les prélèvements sont forcément en nombre limité car destructifs et coûteux en temps, voire pris aux mauvais endroits. Toutefois, il existe une autre méthode pour évaluer la santé des plantes : la mesure de leur réflectance, c'est-à-dire la lumière qu'elles réfléchissent dans différentes longueurs d'onde non visibles à l'œil. Il faut pour cela prendre une photo avec un capteur multispectral (infrarouge, vert, rouge), puis corréler la photo obtenue en fausses couleurs avec des modèles agronomiques. Et comme le meilleur moyen d'obtenir une vue de toute une parcelle reste la photo aérienne, le drone a son rôle à jouer.

Les grands espaces vides d'obstacles et les champs ouverts sont le terrain de jeu idéal des voilures fixes à longue endurance. Pour la prise de vues, le drone est équipé d'un appareil photo spécial, composé de plusieurs capteurs.

Les photos sont assemblées et la surface à l'écran est divisée en petites parcelles avec, pour chacune, une quantité d'azote à répandre. Ces données sont entrées dans le logiciel du distributeur d'engrais remorqué au tracteur. Le distributeur répartit alors la quantité d'engrais avec une précision GPS.

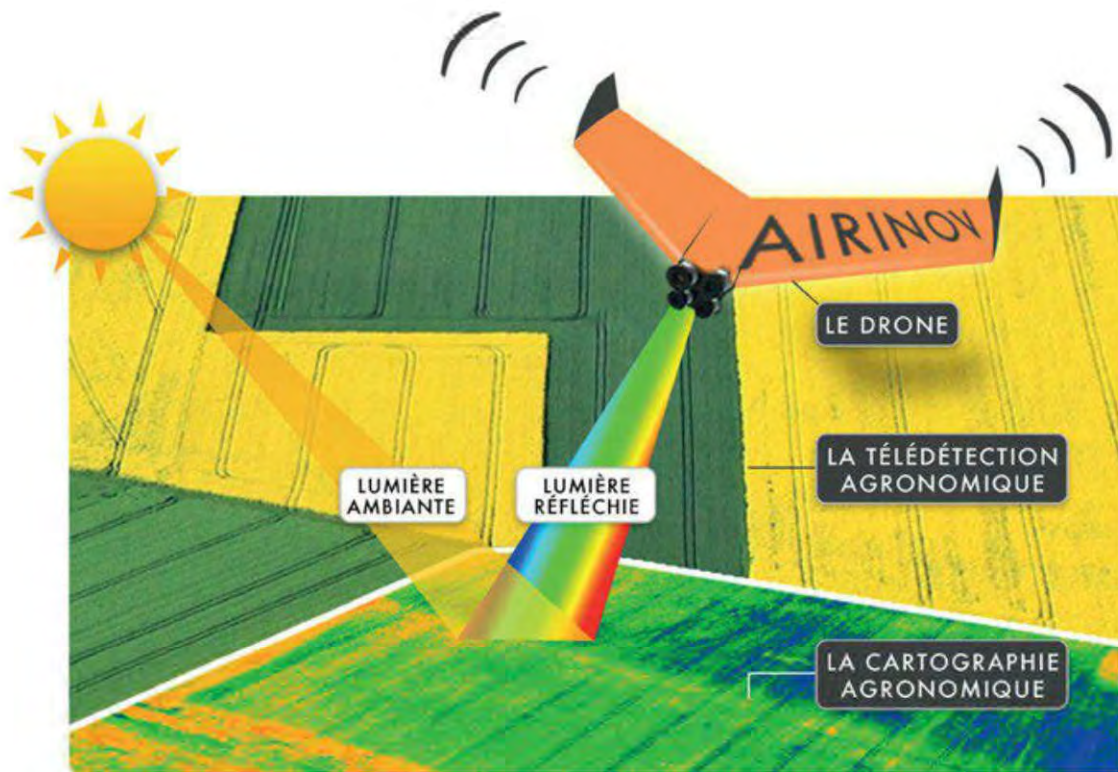


Figure 5-10. Principe de mesure de la réflectance par drone (Airinov)

Le bénéfice pour l'agriculteur est double :

- il économise sur la quantité d'engrais ;
- il augmente sa production grâce à un rendement plus important.

ÉPANDAGE

L'épandage aérien est interdit en France, par application d'une directive européenne, en raison des risques de pollution des sols. Il est cependant autorisé par dérogation au cas par cas. L'agriculture ne s'en est pas complètement affranchie pour le sulfatage des vignes ou l'envoi de pesticides dans les champs en forte pente ou difficiles d'accès. Jusqu'à présent, ce travail était confié, en France, à la cinquantaine d'hélicoptères et avions équipés. C'est dans les plaines du *Middle West* américain qu'il est le plus utilisé, avec ces petits avions jaunes monomoteurs dont le cockpit semble exagérément placé à l'arrière : la raison en est que le malheureux pilote est ainsi mieux protégé en cas de crash. Car il y en a beaucoup ! L'épandage nécessite des vols à moins de 20 m de hauteur, ce qui est extrêmement périlleux. En effectuant de l'épandage par drone, on gagne sur tous les tableaux : les crashes n'ont pas de conséquences humaines, et celles pour l'environnement sont moindres car le dosage est plus précis.

Le Japon avait initié l'épandage par drone dès les années 1990 comme un moyen de pallier un manque de main-d'œuvre rurale. Ils sont exploités par une équipe composée d'un télépilote et d'un guetteur, qui se place à une extrémité de la parcelle et veille à ce que les limites ne soient pas dépassées. Le Japon a été rejoint depuis par ses voisins chinois et coréens. Le commerce du matériel d'épandage aérien, drones compris, est freiné par un contrôle strict. Personne n'aimerait voir des terroristes ou des militaires épandre n'importe quoi par ce biais. Et puis, la quantité de produit embarquée se limite à quelques dizaines de litres, pour les drones les plus gros : ces quantités ne conviennent qu'aux petites parcelles.



Figure 5-11. Épandage par hélicoptère radiocommandé en Chine

RECENSEMENT DE LA FLORE ET DE LA FAUNE

Dans certaines grandes plantations, par exemple celles d'huile de palme, il est souvent nécessaire de compter les arbres. Ce travail, traditionnellement effectué au sol, est long et fastidieux. Comme les arbres se détachent bien sur une photographie aérienne, c'est une application prometteuse pour les drones.

Pour protéger la biodiversité d'espaces protégées (parc régionaux, réserves naturelles, marais), les scientifiques recensent régulièrement la population d'animaux et leur habitat. Ce recensement est souvent réalisé à pied dans des zones naturelles difficiles d'accès et pour lesquelles la moindre intervention humaine dérange les animaux les plus farouches. Les drones électriques apportent une solution intéressante, car ils émettent peu de bruit et peu de CO₂.

Compter manuellement des sujets ou animaux sur des photos est fastidieux. Or il existe depuis une décennie des logiciels de reconnaissance de formes et de comptage automatique depuis des photos qui font merveille, notamment pour l'analyse d'images médicales (par exemple, le comptage des globules rouges d'une goutte de sang grossie au microscope) ou la recherche de défaut de montage de matériel informatique. Leurs usages sont actuellement au stade expérimental pour les images prises en extérieur car les ombres et les différences d'exposition complexifient la donne.

Relevés topographiques

Le monde de la construction mesure constamment distances et volumes :

- un terrassier ou une carrière doit connaître le volume de granulats extraits ou stockés ;
- le maître d'œuvre doit estimer la longueur de bitume que son sous-traitant a écoulé dans la semaine, pour effectuer le paiement ;
- le propriétaire d'une ligne électrique a pour obligation de garantir une distance minimale à la végétation environnante ;
- les digues de rivières doivent être inspectées pour prévenir toute rupture.

Les occasions de sortir un mètre à mesurer ne manquent pas ! Traditionnellement, ces mesures sont réalisées par des topographes et se font au sol à partir de prises de coordonnées horizontales (axes X et Y) et verticales (axe Z) en promenant un récepteur GPS. Ce procédé implique que les zones à relever soient accessibles à pied. Mais prendre des relevés sur une pente non stabilisée, dans un chantier au milieu des pelleteuses ou dans un marais n'est pas sans danger. Le nombre de relevés est limité au temps passé à aller physiquement d'un endroit à l'autre, planter son antenne, interroger le GPS, enregistrer la donnée et recommencer. En raison de cette rareté, il faut extrapoler pour calculer un volume, qui prend alors une forme géométrique. Or plus le nombre de points est grand, plus la forme est conforme à la réalité.

Pourtant, il existe depuis les débuts de l'aviation une méthode de mesure depuis les airs, à partir de photos aériennes. Elle a été utilisée pour produire des cartes, notamment militaires dès la fin du XIX^e siècle. L'idée est d'assembler des photos en s'appuyant sur des points de repères visibles du ciel dont les coordonnées sont connues pour donner l'échelle. Toute la difficulté réside dans la nécessité de savoir où l'appareil photo se trouve au moment où la photo est prise, pour ensuite la positionner et l'orienter. L'assemblage des photos se faisait à la main, un vrai travail d'artiste.

La photographie numérique et la puissance de calcul des ordinateurs ont rendu le procédé automatique à partir des années 2000 : il est désormais possible de reconstituer un ensemble d'images 2D et un modèle numérique en trois dimensions, sans savoir exactement où l'appareil photo se trouvait. Un logiciel photogrammétrique extrait des milliers de points à partir des photos. Il s'agit de détails à fort contraste (des pierres, des buissons, des coins d'immeuble...). Ces points sont utilisés pour lier les photos une à une et déterminer de quelle manière ils se chevauchent. Comme ils sont visibles à des distances et des angles différents, le logiciel est capable de calculer la position de l'appareil au moment où le cliché a été pris ; il détermine aussi son orientation, ainsi qu'un modèle mathématique permettant de corriger les distorsions optiques (déformation des coins de l'image), d'en estimer la hauteur, en référence à celle de l'appareil que l'autopilote enregistre en continu. Cette méthode est l'application moderne du théorème de Thalès. Pour que le procédé fonctionne, il faut une prise de vue appropriée (recouvrement supérieur à 60 %, ouverture et vitesse constante).

Contrairement à une idée reçue, il n'y a pas besoin de deux appareils photos à bord pour obtenir la 3D : un seul appareil photo est suffisant et ce peut être un simple appareil du commerce. Les préférences vont à une optique grand-angle de façon à couvrir le plus de surface à une hauteur donnée et minimiser ainsi le risque de flou de file dû au déplacement

de l'avion. Les appareils photo à optique interchangeable, à 10 millions de pixels ou plus, font merveille. Comme ils sont légers, ils peuvent être embarqués à bord d'un drone.



Figure 5-12. Schématisation d'un drone prenant des photos verticales dont les emprises sont représentées par des rectangles bleus se chevauchant

Afin d'augmenter encore la précision de la modélisation, il est possible d'ajouter des cibles dont on mesure les coordonnées au sol par des techniques classiques de topographie. Cela permet également le géoréférencement précis des photos dans un système de coordonnées national ou mondial. La précision, c'est la différence de localisation entre la représentation et la réalité. Sans cible, donc en utilisant le GPS de bord seul, on obtient une précision de l'ordre d'1 m en X et Y et de 5 m en Z. En photogrammétrie, l'erreur est toujours au moins le double en vertical qu'en horizontal. Ajouter des cibles, des planches d'au moins 50 cm sur 50 cm marquées d'une croix (figure 5-13) et si possible attachées au sol, permet d'obtenir une précision de quelques centimètres.



Figure 5-13. Exemple de cible mobile dont les coordonnées centimétriques sont relevées au GPS

Par exemple, le Trimble X100 donne une précision d'environ 8 cm en X et Y et 20 cm en Z, à 150 m de hauteur. Les cibles doivent être réparties uniformément sur la zone d'étude. Trois cibles suffisent pour être prises en compte, mais l'optimum consiste à en poser à chaque coin du terrain et une au centre. De la sorte, la précision est de moins de 4 cm en planimétrie et 10 cm en altimétrie.



Figure 5-14. Tryptique de photos se suivant avec 75 % de recouvrement, prises par le Trimble X100, montrant des cultures

Les produits de la photogrammétrie sont :

- une grande photo 2D orthorectifiée, appelée « orthophoto » ;
- une représentation 3D, appelée « modèle numérique de surface » (et notée MNS).

Orthorectifié signifie « plat et à résolution constante ». Par exemple, sur une photogrammétrie d'un immeuble, les façades verticales seront redressées ; on ne les verra pas sur l'orthophoto. La résolution définit la taille de chaque pixel en cm. Elle dépend directement de la hauteur de vol (sur une même zone, plus je vole bas, plus il y aura de pixels dans l'orthophoto et plus ceux-ci seront petits). Par exemple, le Trimble X100 produit des résultats probants à ce sujet (figures 5-15 et 5-16).

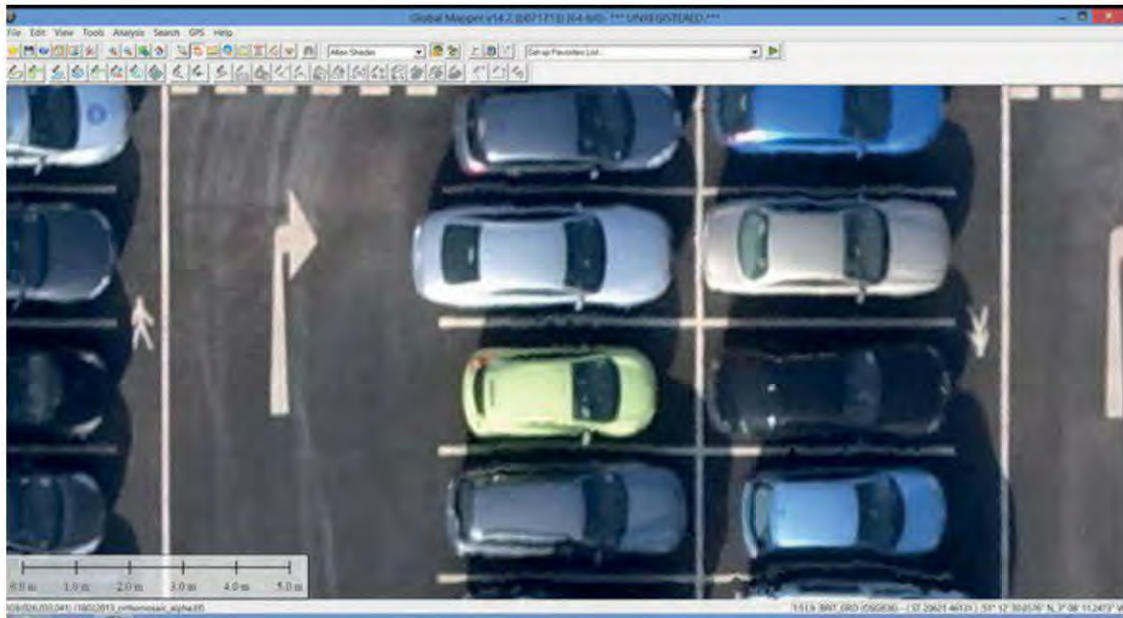


Figure 5-15. Exemple de définition : 1 pixel pour 3,7 cm à 100 m de hauteur

L'échelle dépend aussi de la distance focale : plus elle est longue et plus l'échelle est grande. Généralement, les drones civils fonctionnent avec des appareils photos à focale fixe, donc c'est une constante. La variable est la hauteur de vol.

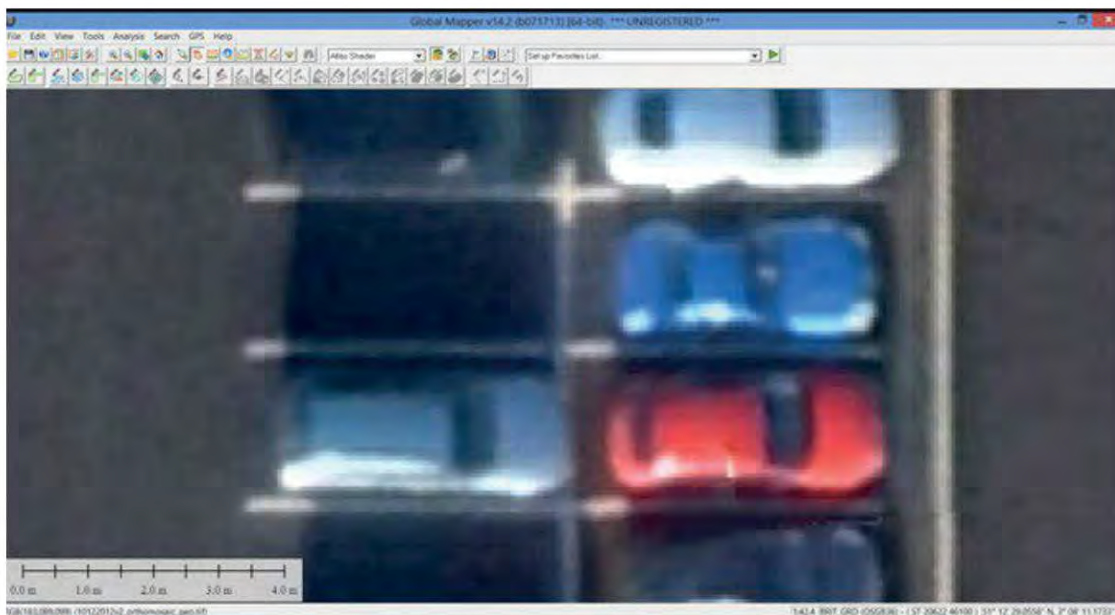


Figure 5-16. Exemple de définition : 1 pixel pour 6,7 cm à 190 m de hauteur

Naturellement, pour un même temps de vol, la hauteur influence directement la taille de la surface couverte : plus je vole haut et plus je couvre une grande surface par vol, mais comme nous l'avons vu, plus je perds de détails...

Tableau 5-1. Performances photogrammétriques du Trimble X100 en fonction de la hauteur de vol

HAUTEUR	SURFACE COUVERTE PAR VOL	TAILLE DU PIXEL
100 m	0,8 km ²	3,7 cm
150 m	1,2 km ²	5,3 cm
190 m	1,6 km ²	6,7 cm



Figure 5-17. Orthophoto ; en haut, une côte rocheuse

L'orthophoto est visionnable sur un logiciel de photographie classique (iPhoto, Photoshop, Lightroom...) mais il est préférable d'utiliser un logiciel SIG (Système information géographique) tel que Google Earth, Global Mapper ou ArcGIS. Ces derniers reconnaissent le géoréférencement. Un point sur l'orthophoto exprime une latitude et une longitude : il suffit donc de définir au moins 2 points à la souris pour obtenir une longueur, d'au moins 3 pour une surface et de 4 pour un volume. C'est beaucoup plus pratique que de sortir son mètre à mesurer !

Un modèle numérique de surface est une représentation 3D en fausses couleurs qui expriment l'altitude. Il vaut mieux le visionner sur un SIG car il dispose des options de vision 3D, ce qui permet de faire pivoter le paysage dans toutes les directions, comme si vous voliez au-dessus du terrain. Il ne faut pas confondre modèle numérique de surface et modèle numérique de terrain. Le modèle numérique de surface est « brut » : il contient les cimes des arbres, les toits, les voitures... Le modèle numérique de terrain est un modèle de surface dépouillé de tout obstacle artificiel ou naturel non voulu. Il requiert donc un travail d'édition pour éliminer ces éléments « parasites ».

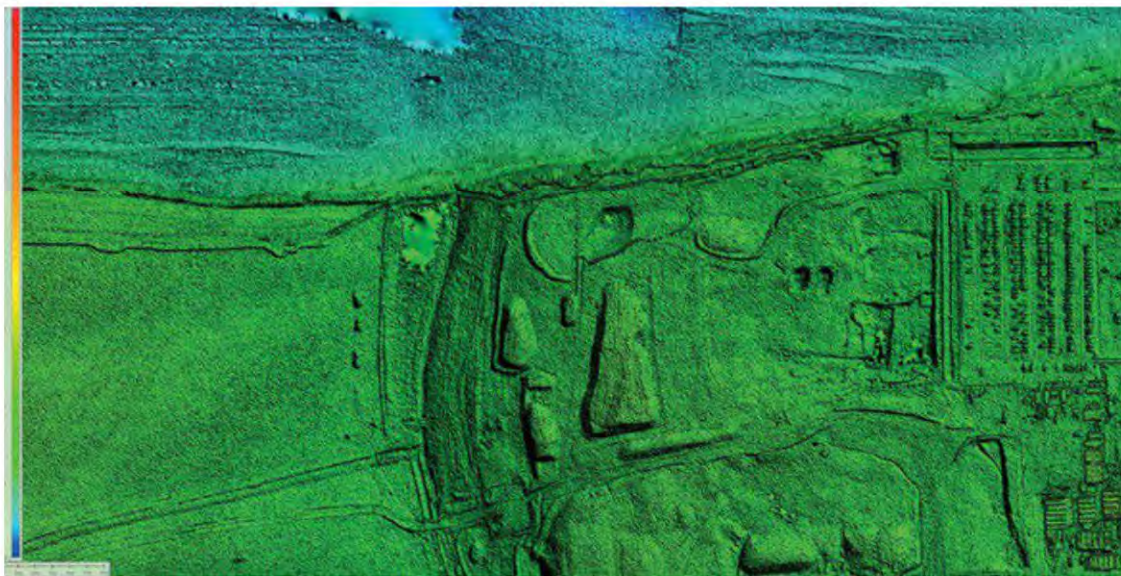


Figure 5-18. Modèle numérique de surface, superposable à l'orthophoto précédente, dont l'échelle de couleur va de 0 m (niveau de la mer) à 40 m

Les MNS ont deux fonctions principales : l'extraction de courbes de niveau et le calcul de volumes.

EXTRACTION DE COURBES

Extraire des courbes de niveau d'un MNS est d'une grande simplicité. Il suffit de délimiter le niveau à l'écran puis de lever quelques options telles que l'intervalle en mètres entre les courbes et le degré de simplification. Comme dit précédemment, le MNS prend en compte tout ce qui est en surface. De fait, un certain degré de simplification est nécessaire pour éviter une allure trop accidentée, y compris sur les surfaces planes.

Notez que les orthophotos, MNS et courbes de niveau sont combinables. Le MNS peut être ainsi drapé (recouvert) par l'orthophoto, ce qui facilite le repérage.



Figure 5-19. Courbes de niveaux d'1 m d'intervalle, en surimpression d'une orthophoto. Il s'agit d'une zone humide qui aurait été difficile à prendre en topographie classique.



Figure 5-20. Exemple de vision 3D montrant une orthophoto drapant un MNS

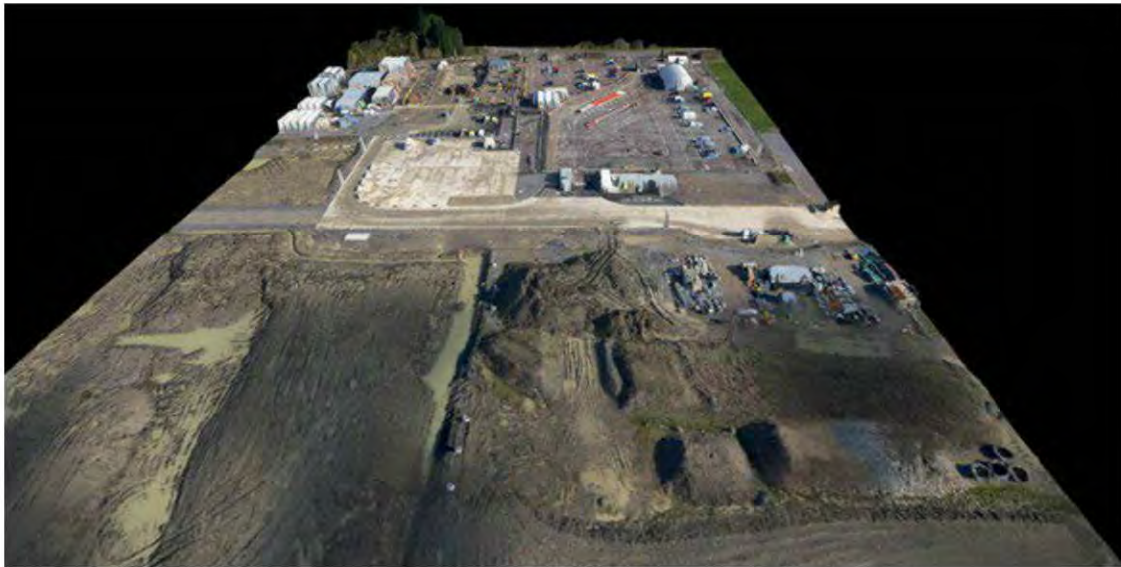


Figure 5-21. Autre exemple de vision 3D montrant une orthophoto drapant un MNS

CALCUL D'UN VOLUME À PARTIR D'UN MNS

Imaginons que nous voulions connaître le volume du monticule de terre situé au centre de l'orthophoto suivante drapant un MNS (figure 5-22).



Figure 5-22. Orthophoto d'un monticule de terre dont on souhaite calculer le volume

Le calcul du volume s'effectue en deux étapes.

1. Délimiter la zone concernée en l'entourant d'un trait.
2. Sélectionner l'échelle et indiquer l'altitude à laquelle commence le calcul du volume : il s'agit ici de l'altitude des points entourant la zone.

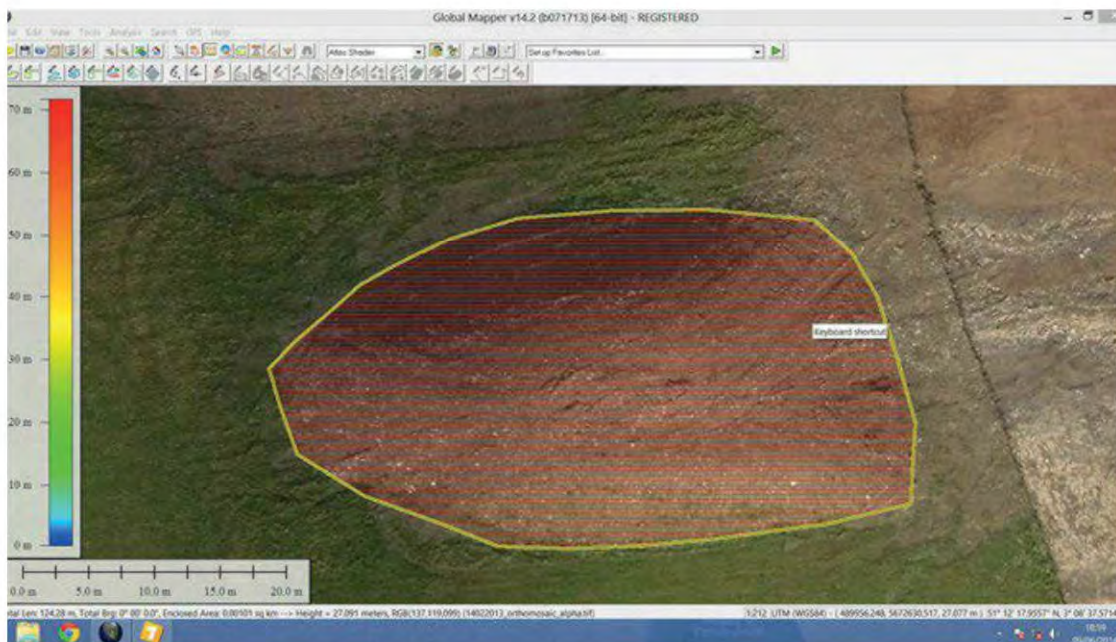


Figure 5-23. Première étape : le monticule sélectionné est entouré.

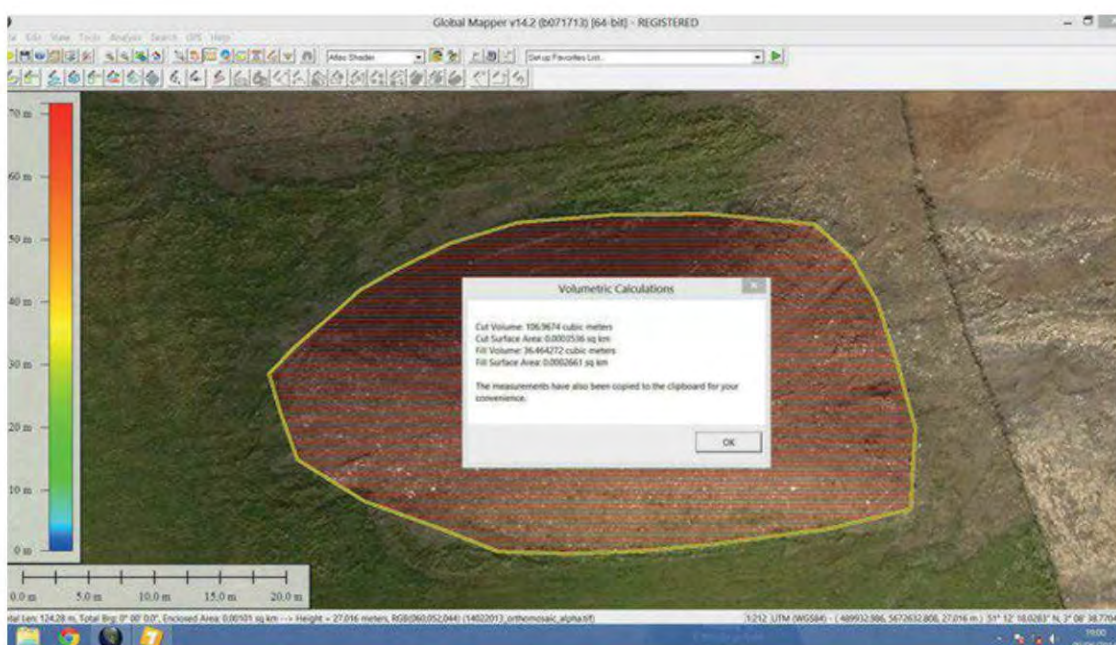


Figure 5-24. Seconde étape : on spécifie les paramètres de calcul.

Le SIG calcule le volume de la zone sélectionnée, dont l'altitude est supérieure aux points qui ont servi à la délimiter.

Ici, le volume est de 106 m³ et la surface de 353 m².

Notez que le calcul fonctionne aussi en négatif, pour les excavations. Imaginons que nous souhaitions calculer le volume de l'excavation au centre de l'orthophoto suivante (figure 5-25)

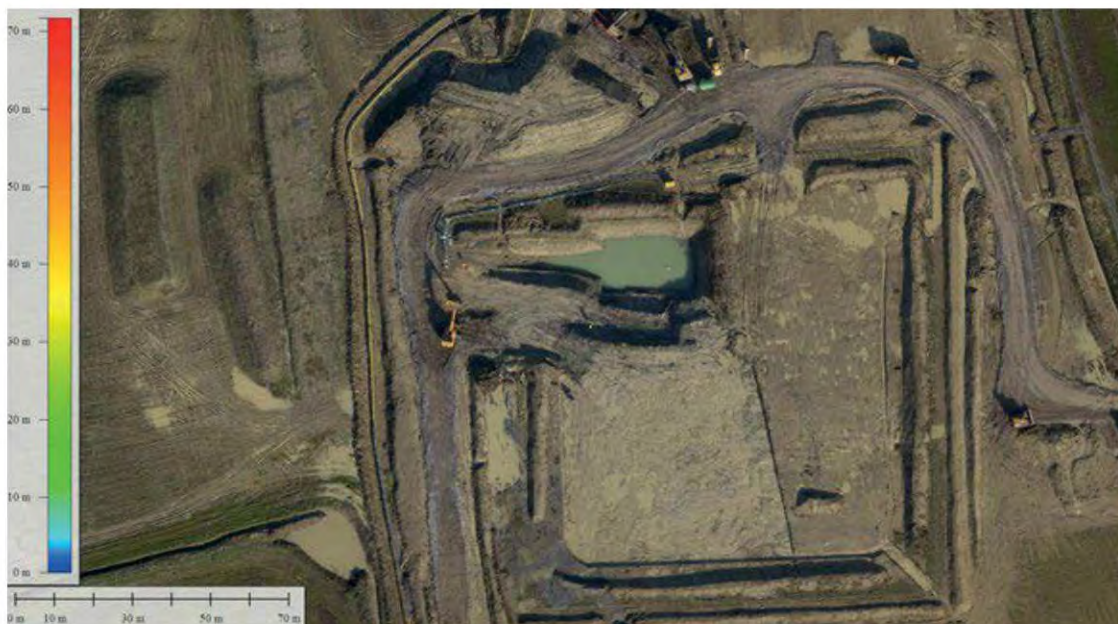


Figure 5-25. Orthophoto d'une excavation dont on souhaite calculer le volume

La zone est entourée en cliquant tout autour : ici, la surface sélectionnée mesure 263 m².



Figure 5-26. Première étape : l'excavation sélectionnée est entourée.

Dans ce cas, le volume est de 286 m³. Il ne prend pas en compte ce qui est sous la surface de l'eau.

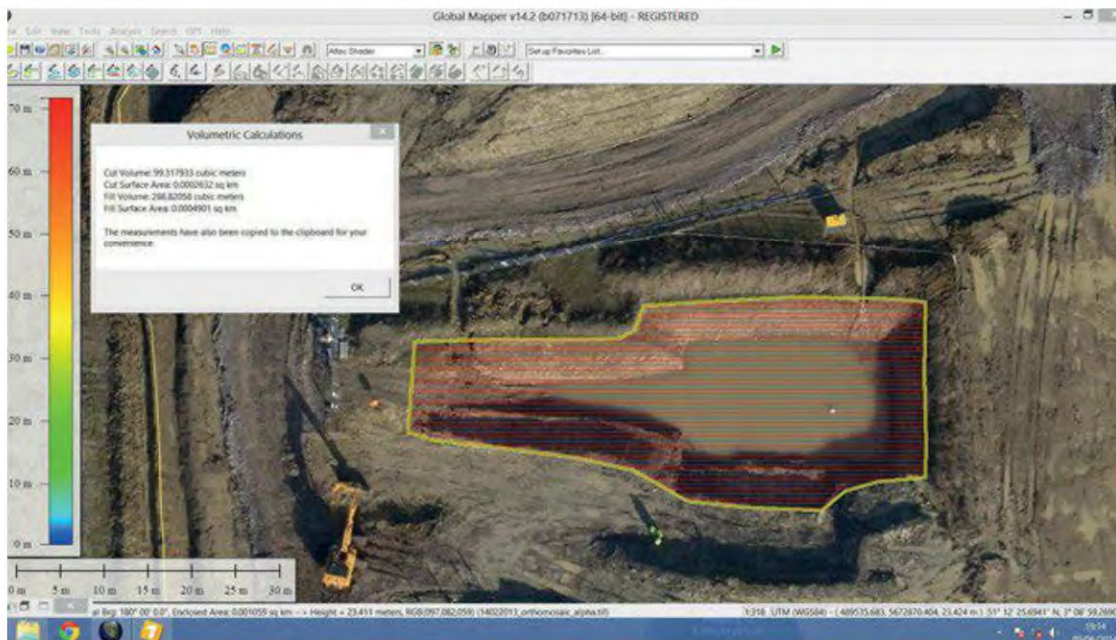


Figure 5-27. Seconde étape : on spécifie les paramètres de calcul.

Bien sûr, la précision du calcul dépend beaucoup d'une bonne sélection de la zone. Des repères au sol, visibles sur l'orthophoto, constituent une aide précieuse.

ÉVOLUTION D'UN PAYSAGE

Les vols de drones sont reproductibles, de sorte que des vols à intervalle régulier peuvent montrer un paysage en évolution : on parle de représentation 4D (représentation 3D à laquelle on ajoute une quatrième dimension, le temps).



Figure 5-28. Vues hebdomadaires de défrichage pour la préparation d'un chantier

LIMITES DE LA PHOTOGRAMMÉTRIE PAR DRONE

Les drones vont-ils rendre caduques les méthodes topographiques terrestres ? Ce n'est pas sûr, car le procédé ne fonctionne pas dans n'importe quel contexte.

En premier lieu, comme il s'agit de photographies à vitesse d'obturation rapide, ce système ne peut être utilisé qu'à la lumière du jour.

D'autre part, les surfaces réfléchives (eau, surfaces vitrées) ou encore les motifs répétitifs (toitures, motifs architecturaux) ne permettent pas d'extraire des points communs exploitables. Le logiciel n'arrive pas à assembler les photos prises au-dessus de ces surfaces. De même, les surfaces ombragées perdent en détails.

Ensuite, les sujets doivent être immobiles pour être pris en photo plusieurs fois à quelques secondes d'intervalle. Les véhicules ou animaux en mouvement ne seront donc pas modélisés. Ces sujets pourront figurer à plusieurs reprises sur une orthophoto mais n'apparaîtront pas sur le DSM.



Figure 5-29. Cette orthophoto laisse penser qu'il y a deux pelleteuses ; en fait, il n'y a qu'une, prise en photo à plusieurs endroits à chaque passage du drone.

Autre inconvénient, la photogrammétrie automatique rend les arêtes de bâtiments floues. Pour y remédier, le plus simple est de coller par endroits la photo d'origine.



Figure 5-30. Les arrêtes des toits de ces maisons apparaissent floues.

Enfin, sans travail d'édition, le DSM traduit mal la forte verticalité (murs, poteaux).



Figure 5-31. La verticalité de ces bâtiments industriels doit être redressée.

Un taux de recouvrement encore plus fort (80 %) atténue le problème, mais cela réduit la surface couverte par vol et augmente considérablement le temps de traitement. Pour obtenir des formes géométriques réalistes, il faut utiliser des logiciels de vectorisation.

La forme complexe du feuillage passe mal en DSM, d'autant que le vent peut changer la forme entre les photos et ainsi brouiller la détection de points de ressemblance entre les images. Sans un taux de recouvrement très élevé, les arbres ressemblent à des rochers.

Le traitement informatique prend du temps. Il faut moins d'une nuit pour traiter 1 000 photos de 10 millions de pixels chacune par un ordinateur disposant de 32 Go de RAM (un très bon ordinateur de jeu). Mais le temps augmente de façon exponentielle si le nombre de photos ou leur définition augmente.

Un DSM comprend des millions de points. Il est souvent nécessaire de le simplifier pour pouvoir travailler. Les photos subissent des variations d'exposition, en cas de passage nuageux. Les petits capteurs des appareils photo compacts y étant sensibles, cela se traduit par des bandes foncées parallèles sur l'orthophoto. Ce défaut peut être traité à la source, en retirant les photos les plus sombres, ou en postproduction, en modifiant l'exposition de certaines zones.

La photogrammétrie par drone se fait aujourd'hui concurrencer par des Lidar, sortes de radars reproduisant des formes réfléchies sur 360°, sans prises de vue. Compte tenu de leur poids (plus d'1 kg), ils restent pour l'instant réservés aux grands drones, mais cela va sans doute changer.

Inspection d'ouvrages ou de matériel

Dans le vieux pays qui est le nôtre, l'heure est moins à la construction qu'au maintien en l'état des ouvrages d'art existants : ponts, barrages, fermes éoliennes ou photovoltaïques, lignes électriques, canaux... Leurs opérateurs (SNCF, GRT Gaz, Véolia, ERDF, RTE, CNR, etc.) doivent en connaître précisément l'état et les performances afin d'assurer la maintenance.

Les parois en béton des barrages et des ponts sont oscultées méthodiquement et les fissures soigneusement répertoriées et surveillées. Les canalisations, les pipelines sont parcourus à la recherche de fuite ou de traces de corrosion. Les panneaux photovoltaïques sont régulièrement testés et remplacés le cas échéant. Les pales d'éoliennes sont observées du sol avec des jumelles ou prises en photo au téléobjectif pour y déceler de minuscules défauts. Les isolateurs des lignes électriques sont régulièrement inspectés par les lignards à la recherche de points chauds. Tout cela implique des visites d'inspection souvent en hauteur au moyen de plates-formes élévatrices, de cordes, d'échafaudages et de longs déplacements par tout type de véhicules ou à pied, sur tous les sites des ouvrages, y compris à la montagne.

D'où l'intérêt des drones, qui offrent la possibilité de promener un capteur là où l'homme ne peut prêter que ses yeux et oreilles, parfois au péril de sa vie. Mentionnons, par exemple, la première visite décennale du viaduc de Millau, en 2011, qui a fait parler d'elle puisqu'elle a été réalisée par un drone. Et d'autres expériences ont suivi en grand nombre. Même easyJet a récemment déclaré préparer un programme d'inspection de leurs avions par drone...

Ces drones d'inspection sont des multirrotors qui doivent voler au plus près de l'ouvrage. Leurs taille et design doivent être appropriés pour ne pas mettre en danger l'ouvrage. Les industriels s'intéressent moins aux drones pour leurs performances de vol que pour la qualité et le prix des données produites, exception faite de l'aspect prévention du risque que fait courir le drone lui-même sur l'ouvrage ou le personnel au sol.

Les bénéfices attendus sont les suivants :

- réduire l'exposition du personnel aux risques de travail en hauteur, de noyade, ou d'accidents de plain-pied ;
- automatiser l'acquisition et le traitement de données ;
- rendre reproductible l'acquisition de données ;
- gagner en coût de maintenance : la réaliser seulement là où c'est nécessaire ;
- rendre les ouvrages plus performants grâce à une meilleure maintenance ;
- réduire le temps d'immobilisation de l'ouvrage due à l'inspection ;
- abaisser les coûts d'inspection.

À plus long terme, on peut imaginer des bénéfices encore supérieurs, si les moyens d'accès utilisés et maintenus uniquement pour l'inspection (échelles, escaliers...) n'étaient plus nécessaires, donc plus intégrés au design de nouveaux ouvrages.

De plus, les drones sont un vecteur d'innovation auquel les jeunes sont sensibles. Ils arrivent à point pour redorer l'image des métiers de la maintenance ou de l'ingénierie et donc garantir le remplacement des départs à la retraite. Dans les grandes sociétés sont organisés des challenges innovations où les projets lauréats comportent souvent une application drones...

Transport d'objets

En 2013, la société Amazon a fait sensation en diffusant une vidéo montrant un drone livrant un colis au pied de la maison de ses destinataires. La société DHL lui a aussitôt emboîté le pas avec une vidéo d'une livraison de colis en Allemagne. Quelques chaînes de pizzerias se sont aussi amusées à diffuser des livraisons fictives et quelques plagistes à livrer des cocktails par drone.

Livrer en un temps record, en s'affranchissant des embouteillages, telle serait la prochaine vocation des drones. Pure provocation, pour attirer l'attention des médias et des pouvoirs publics ou réalité proche ? En théorie, un drone de 8 kg peut porter 1 ou 2 kg de charge sur une vingtaine de kilomètres. Mais la technique n'est pas mûre pour être réalisée en milieu urbain : il faudrait des Lidar détecteurs d'obstacles, suffisamment petits pour être embarqués, et une centrale inertielle capable d'assurer la navigation en l'absence de signal GPS ; tout cela n'existe pour l'instant qu'en laboratoire. De surcroît, cette utilisation des drones suppose le pire des scénarios de vol pour la réglementation : vol automatique, hors vue et en zone peuplée ! À cela s'ajoute le risque de voir des drones larguer armes et drogues au-dessus des prisons, voire de commettre des actes terroristes ou même simplement de se faire détrousser de son colis !

Les voies les plus prometteuses de transport d'objet par drone se situent plutôt dans le domaine de l'urgence : largage de vivres, médicaments et bouée en mer. Des essais ont lieu dans l'industrie pour les insérer dans une chaîne d'assemblage et transformer ainsi un tapis roulant en « tapis volant ». Le handicap que constitue la faible charge utile par drone peut être compensé par les avantages que sont sa rapidité et une flexibilité accrue, et surtout par la possibilité de voler en essaim. Des laboratoires ont fait travailler des drones en équipe pour assembler des tours de plusieurs mètres de haut, constituées de blocs de mousse.

D'abord utilisés comme armes pour les militaires, puis comme outils de programmation pour geeks et outils de travail pour artistes photographes, les drones frappent désormais à la porte des industriels : une véritable révolution !

Contraintes et limites des drones

Les contraintes que nous connaissons pour les drones ne leur sont pas propres et concernent tout type d'innovation : son temps d'appropriation par une organisation peut être rapide si elle est soumise à la concurrence... et beaucoup plus long sinon !

- Les drones possèdent peut-être de bons capteurs, mais ils ne peuvent assurer eux-mêmes la maintenance. À l'inverse, les aéronefs habités sont capables dans certains cas de faire preuve de polyvalence ; ainsi, un hélicoptère peut à la fois repérer et élaguer la végétation près des lignes électriques.
- La réglementation actuelle est trop contraignante pour les vols en agglomération ou hors vue. En limitant le poids des drones des vols d'endurance, elle oblige à embarquer des capteurs aux performances en deçà des techniques habituelles.

- Les drones prennent beaucoup de données sans discernement (par exemple, des centaines de photos par pylône inspecté) et leur tri est chronophage. Idéalement, il faudrait les trier à la source, en vol. A contrario, l'Homme réalise cette sélection en temps réel. Il note sur sa tablette ce qui ne va pas.
- Les donneurs d'ordre recherchent un niveau de service identique à celui auquel ils sont habitués avec leurs fournisseurs et techniques habituels. Il s'agit bien souvent de prestations « clés en main », qui intègrent l'ensemble de la chaîne de valeur : demande d'autorisation, acquisition et traitement des données, repérage et caractérisation des défauts sur l'ouvrage, voire préconisation de maintenance... Les opérateurs de drones sont pour l'instant des start-ups incapables de fournir tous les services demandés, et d'engager leur responsabilité en cas de donnée fournie erronée.
- L'utilisation de drones demande des tests et des dérogations auprès de la DGAC (Direction générale de l'aviation civile) pour des scénarios de vol hors normes. Et comme la technologie évolue vite, il faut recommencer les tests, d'où la tentation d'un certain attentisme. Pour y voir plus clair, les donneurs d'ordres essaient de comparer des coûts par unité d'œuvre : par exemple, le coût à l'hectare de la photogrammétrie, au kilomètre de linéaire inspecté, etc.
- Les activités des grands groupes sont supportées par des procédures elles-mêmes englobées dans des systèmes de management. Les modifier nécessite de nombreuses validations, donc du temps et de l'énergie.
- Les grands donneurs d'ordre ont passé des décennies à concentrer leurs efforts sur leur cœur de métier pour réduire les coûts et les risques, de sorte que les visites d'inspection sont souvent externalisées. Changer de procédé implique de se réappropriier certains gestes métiers.
- Les inspections de grands ouvrages (barrages, tours aéroréfrigérantes) sont une obligation mais leur mise en œuvre ne peut être modifiée qu'avec l'aval de l'autorité réglementaire.

RÉGLEMENTATION DES DRONES

« À ceux qui m'ont cru : ils m'ont soutenu. À ceux qui ne m'ont pas cru : ils m'ont motivé. »

Nicolas Ader

En janvier 2014, un jeune entrepreneur publie sur YouTube une vidéo montrant sa ville de Nancy, filmée à la GoPro avec un petit drone DJI Phantom. Le drone monte le long des murs des monuments, passe sous une arcade, slalome entre des lampadaires et survole des passants. Il fait le buzz avec plus de 400 000 connexions. Alertée, la gendarmerie retrouve l'auteur de la vidéo et l'interpelle pour mise en danger de la vie d'autrui. Il est ensuite condamné à 400 euros d'amende. Ce fait divers, qui n'a heureusement pas occasionné de blessés, a porté à la connaissance du grand public l'existence d'une réglementation sur l'usage des drones élaborée par la Direction générale de l'aviation civile (DGAC). Les survols illégaux de centrales nucléaires et autres lieux sensibles pendant l'hiver 2014-2015 ont été aussi l'occasion d'une intense communication à propos des textes.



Figure 6-1. Le siège de la DGAC, dans le 15^e arrondissement de Paris

La DGAC a pour but de sécuriser le ciel et de prévenir les risques de chutes. La France fut un des premiers pays européens à adopter une réglementation sur l'usage des drones avec deux arrêtés parus le 11 avril 2012. Ils ont contribué à l'émergence d'une filière de près de 2 500 opérateurs agréés au 31 mars 2016. Les arrêtés ont ensuite été abrogés par ceux du 17 décembre 2015. Cette nouvelle réglementation est plus souple (augmentation des distances et des masses autorisées pour certains scénarios), tout en comportant des définitions plus précises (<http://www.legifrance.gouv.fr>) et explicités sur le site <http://www.developpement-durable.gouv.fr/Demarches-pour-effectuer-des.html>.

La réglementation autorise l'usage professionnel des drones, qui devient une « activité particulière aéronautique », avec des conditions d'emplois, de matériel, de compétences des pilotes et de restrictions d'espaces. De fait, les « règles de l'air » s'appliquent aux opérateurs comme elles s'appliquent aux pilotes : responsabilité dans la prévention des collisions, vol à vue sous réserve que les conditions météo permettent l'impératif de « voir et éviter », et hauteurs de vols.

Outre la sécurité, les drones posent aussi la question épineuse de la protection des données personnelles et de la vie privée.

Démarches administratives

Il y a deux façons d'utiliser un drone : en tant que loisir ou à titre professionnel. Cela fait des années que les aéromodélistes font voler avions et hélicoptères. Cette activité est autorisée tant qu'elle se déroule hors agglomération, sous 150 m de hauteur et 500 m de distance du télépilote loin d'aérodromes et de préférence sur un terrain d'aéromodélisme, car répertoriés sur les cartes aéronautiques. Enfin, les vols en immersion doivent être accompagnés d'un observateur visuel et sont limités à 200 m de distance et 50 m de hauteur. Après une période de flou législatif, qui aurait pu mettre hors-la-loi un adolescent jouant avec un AR Parrot, la DGAC a précisé le 10 avril 2014, sur son site Internet, qu'un aéromodèle (c'est-à-dire un drone de loisir) pouvait être équipé d'un appareil photo, à condition que ce soit pour un usage personnel et sans nuisance à la vie privée. Cette activité ne doit pas donner lieu à rétribution : si vous vendez vos photos ou que vous effectuez cette prestation dans le cadre de votre travail, vous relevez automatiquement d'une « activité particulière » et vous devez alors vous conformer à l'ensemble de la réglementation décrite dans ce chapitre.

Comme les ULM, les drones évoluent dans un espace administratif simplifié par l'absence de certificat de navigabilité. Toutes les démarches d'autorisation sont déclaratives et sont (pour l'instant) gratuites. La figure 6-2 liste les documents à fournir pour obtenir cette autorisation.

Pour la DGAC, la responsabilité des missions porte sur l'exploitant, c'est-à-dire le responsable de la flotte de drones et l'employeur de télépilotes. L'exploitant est tenu de rédiger un manuel d'activités particulières (MAP) selon une trame type. Il doit y décrire précisément son organisation, ses procédures de formation des pilotes, de préparation, de conduite de vols et de maintenance. Jusqu'aux nouveaux arrêtés de 2015, il devait le déposer à la DGAC. Cette obligation de dépôt est depuis supprimée et remplacée par une simple déclaration d'activité en ligne via un formulaire Cerfa 1547*0. Il doit aussi remettre à la DGAC un bilan annuel d'activité valable 24 mois.

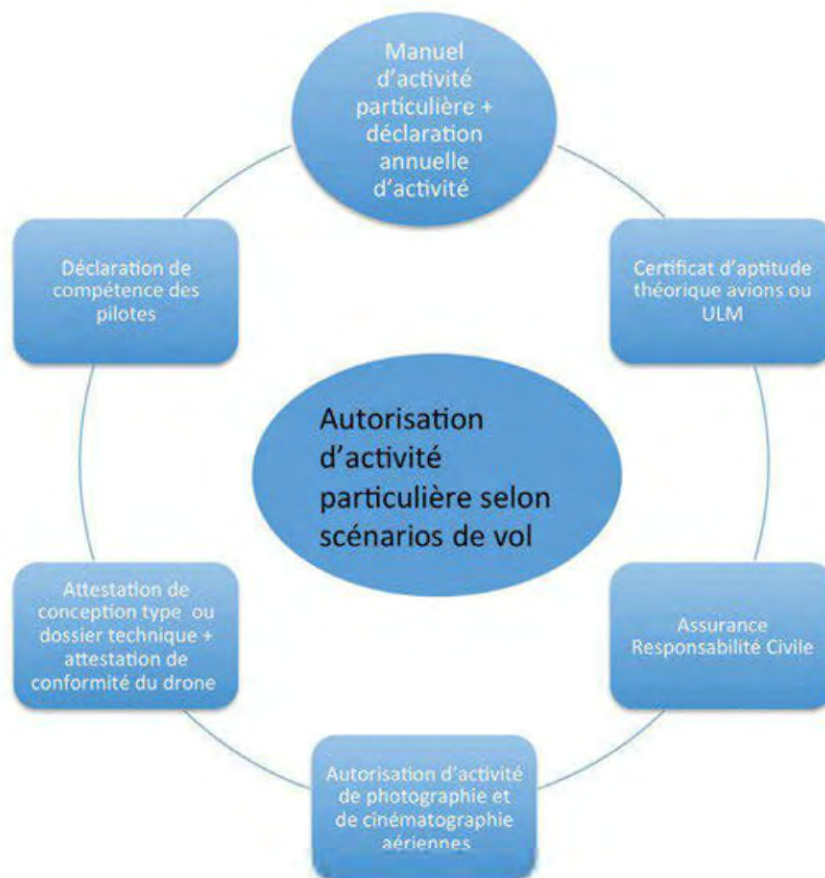


Figure 6-2. Formalités administratives

Les drones utilisés peuvent être de série ou montés par l'opérateur. Dans le premier cas, une attestation de conception type, délivrée par le constructeur ou revendeur, suffit. Assurez-vous donc avant l'achat que toutes les formalités nécessaires ont été remplies. Dans le second cas, l'opérateur fournit un dossier technique d'une vingtaine de pages décrivant précisément, schémas à l'appui, le drone, ses composants, ses équipements de sécurité et leur fonctionnement. Les arrêtés du 17 décembre 2015 limitent l'obligation de conception type aux seuls drones de plus de 2 kg et/ou en vol hors vue.

Télépiloter nécessite un minimum de compétences. Il est demandé aux télépilotes d'être titulaires a minima d'un certificat théorique d'aptitude avions, planeur ou ULM. Les pilotes d'avions déjà existants donnent une nouvelle vie à leur certificat théorique, tandis que les nouveaux venus dans la filière ont tout intérêt à opter pour le théorique ULM, car le plus simple. Cet examen se présente sous la forme de 40 questions à choix multiples, pour lesquelles il faut 75 % de bonnes réponses. Les questions concernent la réglementation aérienne, les connaissances générales de l'appareil, les performances et la limite humaines, la météo, la navigation et les procédures opérationnelles. Pour celles et ceux qui préfèrent suivre une formation théorique à plein temps, une semaine de cours à temps plein devrait suffire. Mais à temps partiel, il faut environ un trimestre à raison d'une demi-journée par semaine en aéroclub. Il faut compter un à deux mois de bachotage pour le réussir, en s'aidant du *Manuel du Pilote ULM* (éditions Cépaduès) et une préparation sur Internet. La DGAC ne requiert pas d'épreuve de vol pratique. Une déclaration de compétence de l'employeur suffit. Comme les questions de l'examen ne s'appliquent pas toutes aux drones, tout en ignorant les spécificités, un examen théorique de télépilote devrait entrer en vigueur au deuxième semestre 2016.

Il revient à l'opérateur de déclarer ses télépilotes compétents à la suite de formations qu'il peut avoir lui-même prodiguées et rédigées dans un manuel de formation. La déclaration de compétence doit être délivrée après au moins un vol de démonstration dont le programme est décrit par l'exploitant dans son MAP et quelques vérifications.

La liste des opérateurs agréés est publiée et mise à jour chaque mois sur le site de la DGAC. N'y figurent pas les opérateurs qui bénéficient d'une autorisation spécifique.

Vous devez en outre fournir une déclaration d'activité de photographie et de cinématographie aérienne déposée à la DGAC avec une copie de votre carte d'identité. Cette obligation vaut pour tout professionnel de la photographie aérienne quel que soit le moyen de transport. Il s'agit de prévenir le terrorisme. Enfin, en tant que professionnel, vous êtes en obligation d'avoir une assurance responsabilité civile. Son prix est d'environ 300 euros par drone et par an. Chaque drone doit emporter une plaquette identifiant son exploitant.

Les autorisations d'activités particulières sont déclinées en scénarios de vols.

Scénarios de vol

Le principe adopté est que les drones ne doivent pas dégrader la sécurité des autres usagers du ciel, ni être dangereux pour les personnes et les biens au sol. La collision d'un avion avec un drone pourrait avoir des conséquences graves. Le risque est d'autant plus grand qu'un drone est difficile à repérer depuis un cockpit. Pour y remédier, les avions et drones sont dans des zones « ségréguées ».

Pour éviter qu'ils se croisent, la réglementation les oblige à voler à des altitudes différentes : moins de 150 m de hauteur (500 ft) pour les drones, et plus de 150 m pour les avions grandeur nature. Par hauteur, nous entendons une hauteur par rapport au sol, alors que l'altitude est mesurée par rapport au niveau de la mer. Mais même à basse hauteur, il est possible de croiser des hélicoptères, des parapentes, des parachutistes, des planeurs, des avions atterrissant ou décollant ou du trafic militaire. Des distances horizontales maximales du télépilote sont donc imposées pour garder une maîtrise du principe du « voir et éviter ». Le télépilote doit les respecter en ayant à bord un GPS, un altimètre barométrique avec un limiteur d'altitude et de distance et une liaison descendante télémétrique.

Pour prévenir les accidents, obligation est faite de respecter une distance horizontale minimale avec les personnes ou animaux qui ne doivent pas être survolés. Cette distance, qui correspond à la chute du drone, ne doit pas être inférieure à 10 m, et elle est variable en fonction de la hauteur et de la vitesse du drone. Elle prend la forme d'un cercle dont le drone, en vol, est le centre. Le rayon de ce cercle est calculé de la façon suivante :

$$v \sqrt{\frac{2h}{g}} \text{ avec } g = 9,81 \text{ m/s}^2 \text{ où } h \text{ est la hauteur (en m) et } v \text{ la vitesse horizontale (en m/s).}$$

Par exemple :

- si je vole à 7 m/s et à 50 m de haut, le cercle est de rayon 15,8 m ;
- si je vole à 7 m/s et à 100 m de haut, le cercle est de rayon 22,3 m.

Autrement dit, plus je vole haut et/ou vite, plus la distance de sécurité est grande. Pour utiliser la formule, il faut bien sûr disposer d'un compteur de vitesse.

Des conditions plus restrictives existent en « zone habitée » au sens large : il s'agit des agglomérations telles que définies en jaune ou orange sur les cartes aéronautiques, mais aussi des zones de rassemblement de personnes (pages, concerts...).



Figure 6-3. Carte aéronautique disponible gratuitement sur <http://carte.f-aero.fr/carte-aero-v2/>

Plus un drone est lourd, plus il est dangereux. Des limites de masse sont donc définies.

Les conditions maximales de poids, hauteurs, distances des zones habitées ou non sont combinées dans quatre scénarios de vols intitulés S_1 , S_2 , S_3 , S_4 et résumés dans le tableau 6-1. Des exigences d'équipements de sécurité et de qualification du pilote y sont ajoutées dans les scénarios les plus complexes. Les Directions de la sécurité de l'aviation civile interrégionales (DSAC) sont l'interlocuteur des demandes d'autorisation des scénarios de vol S_1 et S_2 . Les demandes d'autorisation des plus complexes S_3 et S_4 sont centralisées à la DGAC de Paris.

Tableau 6-1. Résumé des 4 scénarios de vol

SCÉNARIO	S_1	S_2	S_3	S_4
MASSE MAX.	25 kg	25 kg	2 kg sans parachute 8 kg avec parachute	2 kg
HAUTEUR MAX.	150 m	50 m pour les drones > à 2 kg 150 m pour les drones ≤ à 2 kg	150 m	150 m
DISTANCE MAX. DU TÉLÉPILOTE	En vue 200 m	Hors vue 1 000 m	En vue 100 m	Hors vue Pas de limite prédéfinie
ZONE AUTORISÉE	Hors zone peuplée	Sans aucune personne dans cette zone	Agglomération ou à proximité de personnes ou d'animaux	Hors zone peuplée

SCÉNARIO S₁

Caractéristiques du scénario S₁

Distance max. : 200 m

Hauteur max. : 150 m

Poids max. : 25 kg

Zone autorisée : hors zone peuplée

Il s'agit du scénario le moins complexe, car hors agglomération et à faible distance du pilote. Il autorise les machines les plus lourdes (25 kg) et seule une voilure tournante peut opérer dans cet espace si restreint. Ce scénario est relativement facile à obtenir pour des opérateurs « débutants », car il ne nécessite pas de dispositif particulier de sécurité à bord.

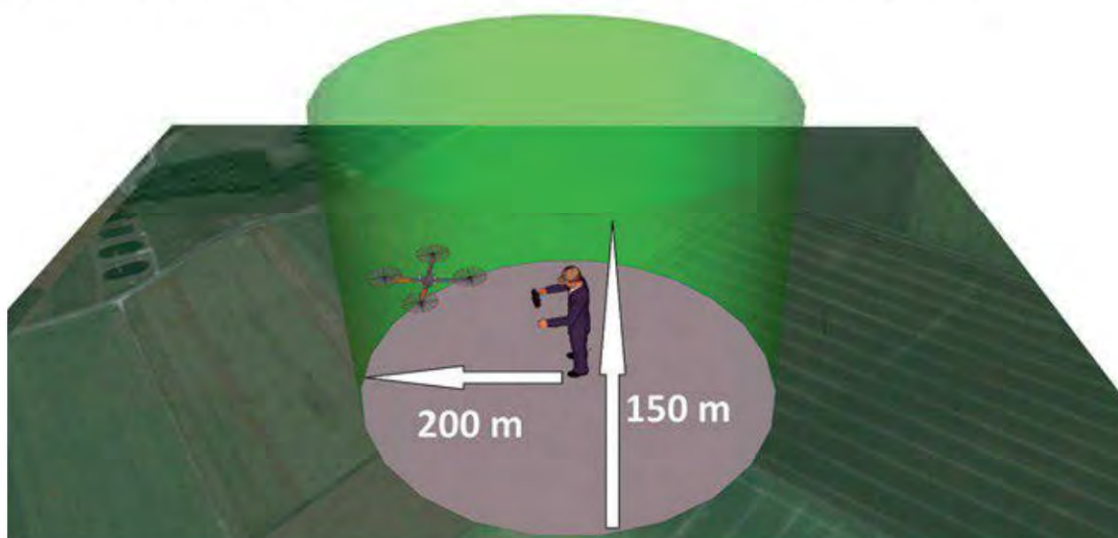


Figure 6-4. Télépilote dans sa bulle S₁, à la campagne

SCÉNARIO S₂

Caractéristiques du scénario S₂

Distance max. : < 1 km

Hauteur max. : 50 m si drone ≤ 2 kg, ou 150 m si drone > 2 kg

Poids max. : 25 kg

Zone autorisée : hors zone peuplée

Le grand espace de vol (d'un rayon allant jusqu'à 1 km) est intéressant pour les voilures fixes, autant que les voilures tournantes performantes, pour réaliser, par exemple, des relevés topographiques.

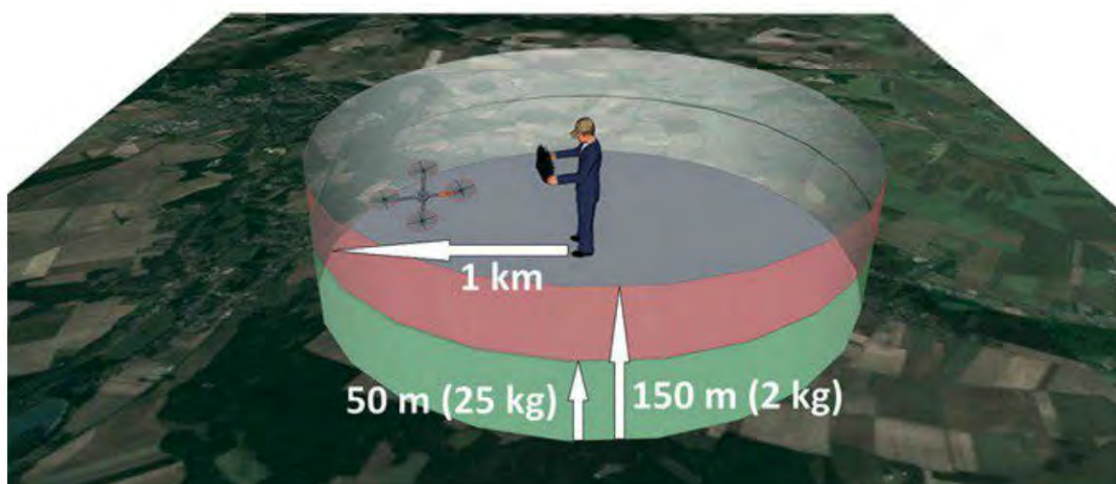


Figure 6-5. Télépilote dans sa bulle élargie S_2 , toujours en pleine campagne

À plusieurs centaines de mètres, le drone peut ne pas être visible. Pour connaître à tout moment sa position exacte et assurer l'évitement avec tout avion qui, lui, reste bien visible à cette distance, il est fait obligation de disposer d'une station de contrôle avec logiciel de navigation cartographique et d'un logiciel empêchant la sortie d'un périmètre prédéfini (*fencing*), avec une alarme. L'opérateur doit aussi s'assurer de l'absence de personnes dans la zone d'évolution. De plus, les paramètres de vols doivent être enregistrés et, en général, les autopilotes respectent cette contrainte. En cas de dépassement de la distance autorisée, le drone doit atterrir automatiquement.

Le télépilote a obligation de notifier son projet de vol S-2 d'une hauteur supérieur à 50 m au plus tard 24 heures avant à l'adresse e-mail dsac-operation-rpa-bf@aviationcivile.gouv.fr.

SCÉNARIO S_3

Caractéristiques du scénario S_3

Distance max. : 100 m
Hauteur max. : 150 m
Poids max. : 2 kg (ou 8 kg max. avec parachute)
Zone autorisée : en agglomération

Ce scénario S_3 est celui qui suscite le plus d'intérêt car c'est en zone peuplée que se situe le plus gros potentiel de travail aérien. Les distances et hauteurs sont les mêmes que pour le S_1 . Pour réduire les conséquences d'une chute, il y a obligation de disposer d'équipements de sécurité particuliers (parachute).

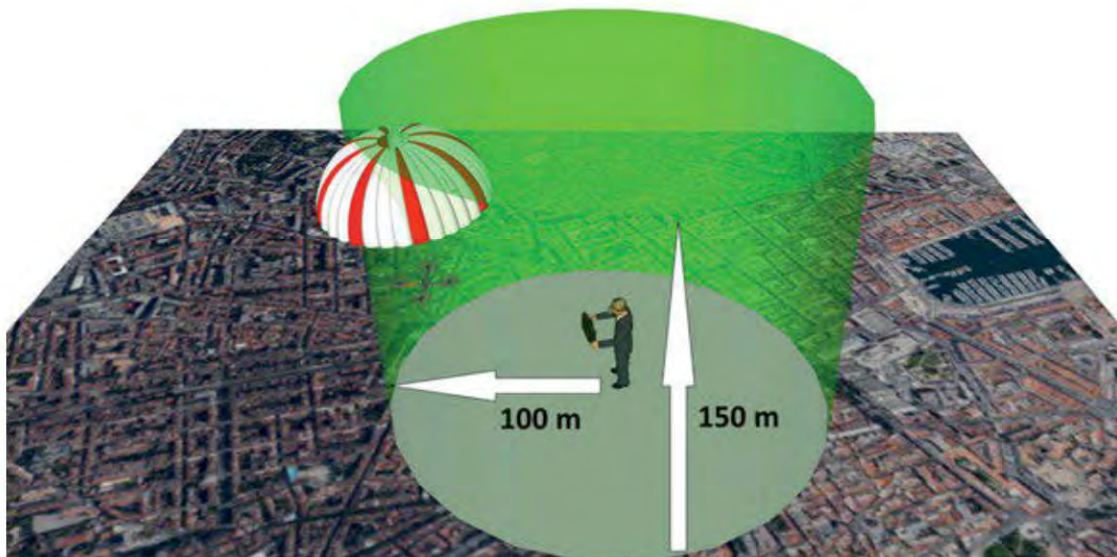


Figure 6-6. Scénario S_3 en agglomération : un parachute doit s'ouvrir si le drone sort de sa bulle ou en cas de perte de la liaison radio.

Pour limiter l'impact d'une chute, le poids est limité à 8 kg s'il dispose d'un parachute et à 2 kg seulement sans celui-ci. Le parachute doit s'actionner automatiquement en cas de sortie de zone et doit aussi pouvoir être ouvert manuellement par le télépilote et limiter l'impact à 65 joules.

L'arrêté du 17 décembre 2015 oblige les drones de plus de 4 kg en S-3 à disposer :

- d'un indicateur de vitesse par rapport au sol ;
- d'une liaison de commande et d'une alimentation du parachute indépendantes de celles du reste du drone ;
- d'un système d'éjection de parachute, qui ne doit pas uniquement être basé sur la gravité. En cas de sortie du parachute, les moteurs doivent se couper automatiquement.

Il faut compter environ 1 m² de surface de parachute par kg de drone. Ce dernier doit pouvoir atterrir automatiquement en cas de perte de liaison de contrôle.

Pour obtenir le sésame du S_3 , l'opérateur envoie à la DGAC une vidéo montrant le bon fonctionnement du parachute. Le cahier des charges est strict : un gros plan doit montrer le drone qui doit être ensuite pesé et faire moins de 8 kg. De plus, la vidéo doit présenter au premier plan le télépilote et le drone pendant tout le vol. La hauteur doit être annoncée, puis le parachute actionné, et la descente jusqu'au sol est filmée. À titre de précaution, il est recommandé de remplacer la charge utile par une masse inerte et de renforcer le drone par quelques protections provisoires.

Chaque mission en agglomération nécessite une notification à la préfecture compétente au moyen d'un formulaire Cerfa 15476*01, avec un préavis d'au moins 5 jours ouvrables. Il revient alors à la préfecture de prévenir les forces de l'ordre et/ou d'imposer éventuellement des restrictions horaires ou opérationnelles à la mission.

Caractéristiques du scénario S₄

Distance max. : hors vue, pas de limite imposée

Hauteur max. : 150

Poids max. : 2 kg

Zone autorisée : hors zone peuplée

C'est le seul des quatre scénarios qui n'a pas de distance préétablies, pour laisser la place à l'expérimentation, à condition qu'il n'y ait pas de perte de liaisons. La hauteur maximale reste de 150 m. Compte tenu des risques pour le trafic aérien, il s'agit d'un scénario expérimental avec des exigences fortes, adapté principalement à l'inspection de linéaires tels que les réseaux électrique, gazier, ferroviaire, ou fluvial.

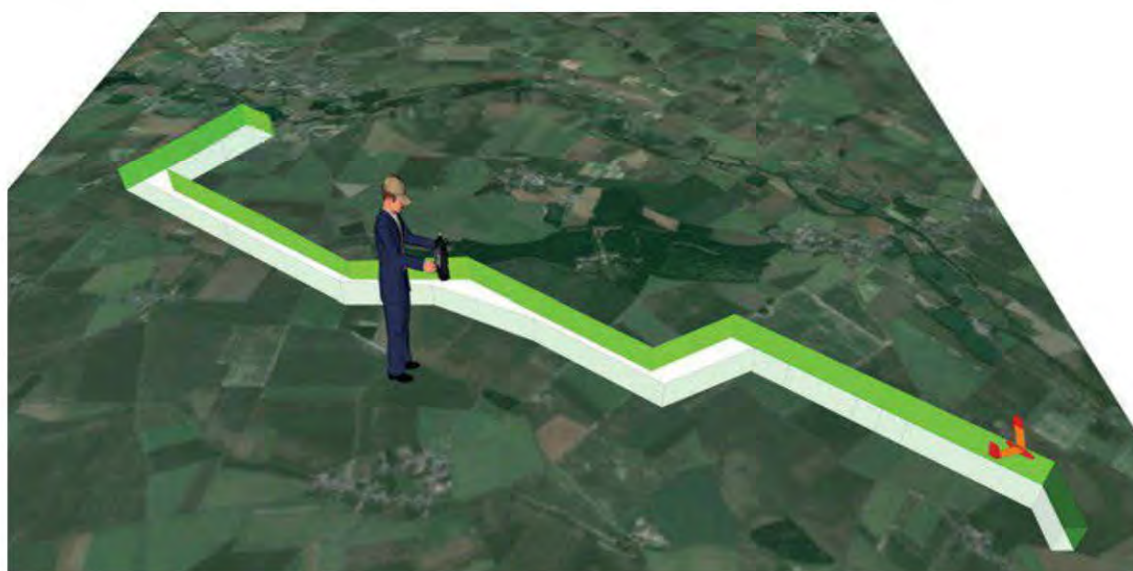


Figure 6-7. Suivi d'une ligne de chemin de fer, avec une aile volante, hors agglomération, en scénario S₄ sur une distance de 15 km de part et d'autre du télépilote resté au centre.

Le poids du drone est limité à 2 kg, celui théorique d'un oiseau au sens aéronautique. Comme pour le S₂, le drone doit être équipé d'un logiciel de navigation cartographique et voler hors zone habitée ; à cela s'ajoute l'obligation d'être équipé d'un retour vidéo filmant vers l'avant. Ce dispositif permet au télépilote d'éviter une zone peuplée en cas de problème.

Les conditions sont également contraignantes pour le télépilote, qui doit être titulaire d'un brevet de pilote d'avions PPL/A ou d'hélicoptères ou encore d'une licence de pilote de planeurs et avoir effectué 100 heures de vols comme commandant de bord et 20 heures sur le drone. Les vols ne sont autorisés qu'après acceptation par la DGAC d'une analyse de risques cosignée par l'opérateur et le donneur d'ordre.

Compte tenu des faibles hauteurs de vols pratiquées, les liaisons sont perdues après environ 15 km de ligne droite et plus rapidement encore en présence d'obstacles. En plaçant la

station de contrôle au milieu du tronçon, la longueur théorique inspectable par vol est tout de même de 30 km : il s'agit d'une valeur limite que seule la présence de relais (peu pratiques) ou une liaison satellitaire (trop chère, volumineuse et lourde) peut atteindre et dépasser.

Restriction des espaces de vol

Les drones ne peuvent être déployés dans certains espaces aériens et sont notamment interdits dans ceux directement en contact avec les aérodromes. Sauf autorisations particulières, ils doivent comme leurs aînés rester à l'écart des zones dangereuses (les champs de tirs de l'armée, par exemple), des zones réglementées (où la pénétration est interdite quand elles sont actives) et des zones de ségrégation temporaire. Ils doivent respecter une hauteur maximale de vol au voisinage des 1 850 aérodromes et hélistations présents en France. Les aérodromes considérés sont ceux qui figurent sur la carte aéronautique au 1/500 000 de l'IGN. Ne sont pas pris en compte les aérodromes privés sur pistes en herbe, qui n'y apparaissent pas. La hauteur autorisée dépend de l'éloignement des axes de pistes.

L'arrêté définit quatre cas, selon le type d'aérodrome.

Cas 1 : aérodrome dont la longueur de piste est inférieure à 1 200 m ou dépourvue de procédures aux instruments

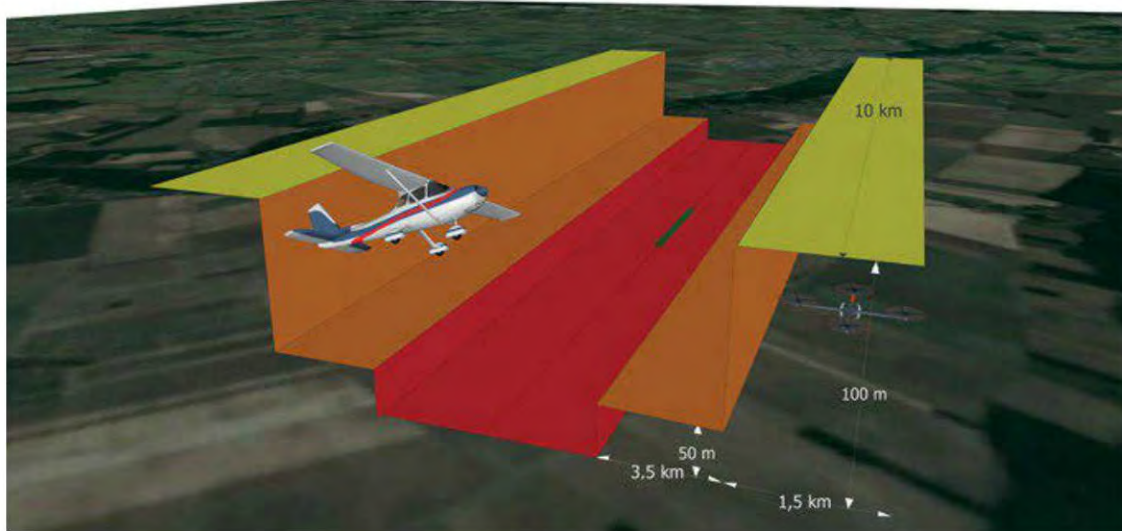


Figure 6-8. Restrictions autour d'un aérodrome dont la piste a une longueur inférieure à 1 200 m

Tout vol est interdit dans un rectangle de 10 × 1 km, orienté dans le sens de la piste et dont le centre est celui de la piste. En dehors de ce rectangle, la hauteur de vol est limitée à 50 m sur une bande de 3,5 km de large, puis à 100 m sur la bande d'1,5 km suivante.

Cas 2 : aéroport dont la longueur de piste est supérieure à 1 200 m ou pourvue de procédures aux instruments

Tout vol est interdit dans un rectangle dont la longueur est composée de la longueur de piste à laquelle on ajoute 10 km à chaque extrémité (soit près de 21 km) et dont la largeur vaut 5 km.

En dehors de ce rectangle, la hauteur de vol est limitée à 30 m sur une bande de 2,5 km de large, puis à 60 m sur la bande des 3 km suivants, puis à 100 m sur les 2 km suivants.

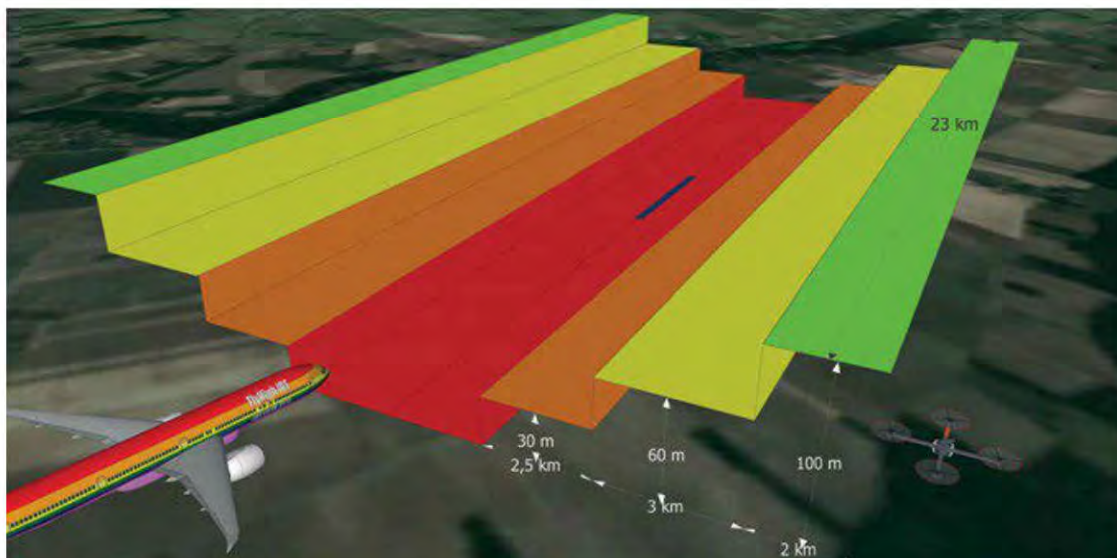


Figure 6-9. Restrictions aux abords d'un aéroport dont la piste a une longueur supérieure à 1 200 m

Cas 3 : hélistation



Figure 6-10. Restrictions aux abords d'une hélistation

La zone d'interdiction ressemble à des cercles concentriques autour de l'hélistation. Les drones sont interdits dans un rayon d'1 km. L'altitude maximale est ensuite de 50 m sur un anneau de largeur 1,5 km, puis de 100 m sur l'anneau suivant de largeur 1 km.

Cas 4 : piste d'ULM

Tout vol est interdit dans un rectangle dont la longueur est composée de la longueur de la piste à laquelle on ajoute 2,5 km de part et d'autre des extrémités de la piste (soit environ 5,5 km) et dont la largeur vaut 1 km. La hauteur maximale est ensuite de 30 m sur une largeur d'1 km, puis de 100 m sur la largeur suivante d'1 km.

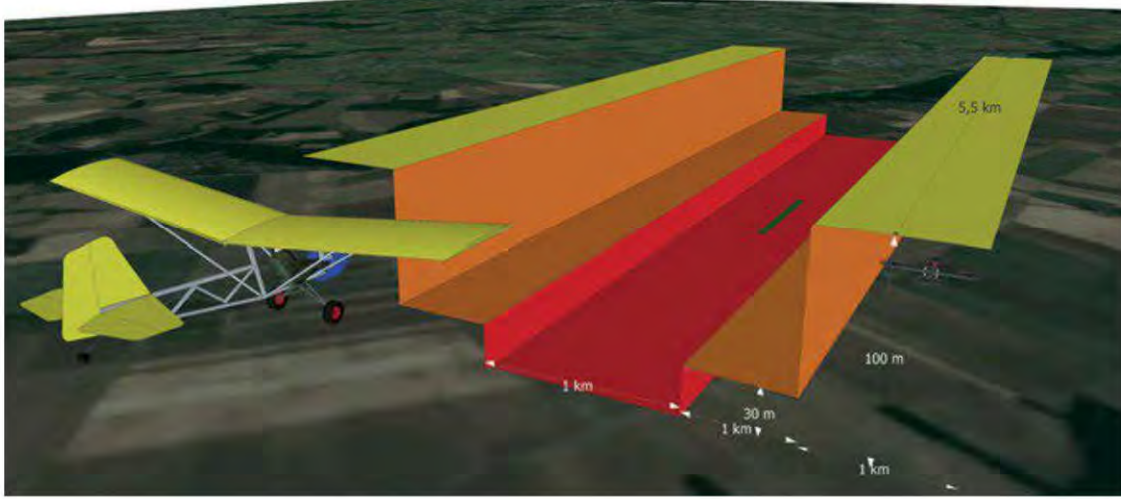


Figure 6-11. Restriction aux abords d'une piste d'ULM

Limites de la réglementation

La réglementation fait émerger un nouveau secteur économique, et son assouplissement dans les nouveaux arrêtés a été bien accueilli par la profession. Mais les textes restent perfectibles !

- C'est sans conteste le manque de formation pratique des télépilotes qui pénalise le plus le système actuel reposant uniquement sur la déclaration de niveau de compétence, voire l'autodéclaration pour l'autoentrepreneur ; or la majorité des opérateurs n'a jamais suivi de formation tandis que les écoles, souvent nouvellement créées par des opérateurs, n'ont reçu aucun agrément. Pour être complète, la formation doit intégrer au moins les 3 composantes suivantes :

- la préparation et la sécurité des vols. Il s'agit pour l'aspirant télépilote de déterminer les risques, les parades et les demandes d'autorisations, pour conduire une mission à un endroit donné. Ce volet peut comporter la préparation à l'examen théorique.

L'examen théorique ULM comporte des questions spécifiques aux ULM et aux appareils habités, donc sans rapport avec les drones. De surcroît, les questions indispensables aux drones (telles que la propulsion électrique, l'utilisation de batteries au lithium polymères et la réglementation particulière des drones) en sont absentes. La DGAC compte beaucoup sur l'autorégulation de la Fédération professionnelle du drone civil pour mettre en place un standard de formation, comme ce fut le cas pour les ULM ;

- l'apprentissage de la conduite du vol, du tout automatique au tout automatisé ;
- l'aspect métier, intégrant tout ou partie de la chaîne de valeur par type de mission : l'inspection de linéaire, la vidéo aérienne, l'inspection thermographique du bâtiment... Cette partie intègre, par exemple, le principe de fonctionnement du capteur à choisir, l'acquisition et le traitement des données.

Face à la pléthore d'offres de formations disponibles et en l'absence de label, il est pour l'instant difficile de faire un choix d'école.

- Outre le fait que les demandes d'autorisation reposent sur des déclarations sans contrôle et donc uniquement sur la bonne foi, l'absence de rencontre réelle entre l'opérateur et la DGAC rend la relation anonyme et crée un véritable handicap pour bâtir des liens de confiance indispensables lors de déclarations d'accidents. L'établissement de statistiques est crucial aussi bien pour la DGAC que pour les opérateurs afin de faire évoluer la réglementation, comme aux assureurs pour déterminer les primes d'assurance. Des accidents arrivent, mais personne ne les déclare de peur de sanctions... La culture aéromodéliste de beaucoup de télépilotes, pour lesquels la casse est fréquente et sans conséquence grave, est persistante. Il y a donc des efforts à accomplir pour générer un véritable dialogue entre les différents intervenants.
- Les zones de restriction font ressembler l'espace ouvert aux drones à un gruyère.



Figure 6-12. Les espaces de restriction aux abords des aérodromes sont en rouge.

Les drones représentant de plus en plus d'emplois, il y a donc une demande légitime quant à l'ouverture d'espaces nouveaux, qui doit se traduire à terme par une intégration dans le trafic aérien. Cela ne peut se faire que par étapes successives pour permettre aux technologies d'évoluer, aux procédures de voir le jour et aux personnes de s'y préparer.

Après le vol à vue de courte distance (scénarios S_1 et S_3) et le vol à vue étendu (S_2), des recherches ont été lancées pour permettre, à l'horizon 2017-2019, l'intégration des drones dans les zones de contrôle, autour des aérodromes, où la séparation entre aéronefs est assurée par une tour de contrôle. Une liaison permanente de communication entre les télépilotes et les tours de contrôle devra être mise en place.

La dernière étape sera l'intégration dans les zones de vol non contrôlée. Celle-ci passe aussi par le développement de technologies nouvelles : établissement de liaison longue distance télépilotes-drones, développement de systèmes permettant « de voir et éviter », mais aussi par la qualification des équipages et certification des matériels et leur maintien en état de vol.

Copyright © 2016 Eyrolles.

[illegible]

Protection de la vie privée et antidrones

142

Lorsque des photos de personnes sont prises, il faut s'interroger sur le respect du droit à l'image, car l'article 9 du Code civil (et sa jurisprudence) précise que toute personne peut s'opposer à la diffusion de son image si elle n'a pas donné expressément son autorisation. Cette obligation est assouplie quand la personne se trouve sur un lieu public. Comme personne ne souhaite être filmé à son insu dans son intimité, la seule vue d'un drone survolant un jardin, prenant ou non des photos, est anxiogène. Il s'agit là d'un motif potentiel de rejet encore plus fort que le risque d'accidents. Le challenge se pose non seulement au moment de l'acquisition des données, mais aussi pendant leur stockage, diffusion ou utilisation. Or les drones prennent une grande quantité de données sans discernement, de façon automatique. En raison de la mobilité du drone et de son utilisation à distance, le photographe est insaisissable. De son côté, Google Street a choisi de flouter les visages ou plaques d'immatriculation.

En soi, la protection de la vie privée n'est pas nouvelle et la Commission nationale informatique et liberté (CNIL) a été constituée à cette fin. Elle peut être sécurisée par l'adoption de comportements et de solutions techniques. L'article L226-1 du code pénal prévoit une punition d'un an d'emprisonnement assortie d'une amende de 45 000 € pour l'atteinte à la vie privée.

Ainsi, l'utilisation de caméras de surveillance sur la voie publique est très encadrée : les opérateurs, habilités par autorisation préfectorale, sont tenus de conserver les données pendant une durée limitée, de les protéger contre toute intrusion et de les rendre disponibles seulement à une demande légitime. Transposer le régime de la vidéosurveillance aux drones nécessite de déterminer qui a le droit de capter et de visionner les images, comment informer les personnes qu'elles peuvent être filmées et éventuellement s'y opposer : pas très pratique...

Il est évident que l'acceptation des drones est plus forte pour un opérateur institutionnel publiant ses règles que pour une des 500 TPE inconnues dont l'activité ne saurait se passer de drones.

Le développement de cette industrie passera aussi par l'adoption commune de règles de bonne conduite en matière de vie privée, vraisemblablement accompagnées de développements de logiciels et de dispositifs spécifiques. En attendant, les systèmes antidrones tiennent la vedette au salon Milipol de Paris-Villepinte.

Les systèmes antidrones au sol peuvent se contenter de détecter et d'enregistrer le passage d'un vol illégal. Le système Drone Tracker de l'allemand Dedrone (voir figure 6-14 page suivante) utilise des capteurs acoustiques et visuels pour la détection et prend des photos du drone intrus. Une alerte est aussitôt envoyée sur le smartphone.



Figure 6-14. Ceci n'est pas un drone, mais le Drone Tracker de Dedrone.

Les systèmes antidrones peuvent aussi neutraliser les drones. Celui en cours de développement chez Airbus Defense and Space détecte des drones à longue distance grâce à une boule optronique munie d'un zoom et d'un scanner qui détermine les fréquences utilisées. Le type de drone est identifié en comparant les mesures des capteurs à une bibliothèque. L'opérateur peut alors choisir de brouiller la liaison de contrôle, le flux vidéo ou le signal GPS. Il devrait être aussi possible d'en prendre le contrôle.

Si l'on compare un drone multiréacteur à un moustique, dont il partage la vulnérabilité, alors un simple filet suffit à l'arrêter. La société française Malou-Tech a développé le MPI-200, un drone de 6 kg équipé d'un filet, pour capturer les drones. Au moyen de lunettes vidéo, le télépilote détecte et poursuit l'intrus. Arrivé près de sa proie, il déploie le filet. Les rotors du drone intercepté s'emmêlent et s'arrêtent. L'intercepté est ensuite ramené au sol, où seront recueillies des informations (carte vidéo, carte de vol, empreintes...) qui aideront à retrouver son propriétaire.

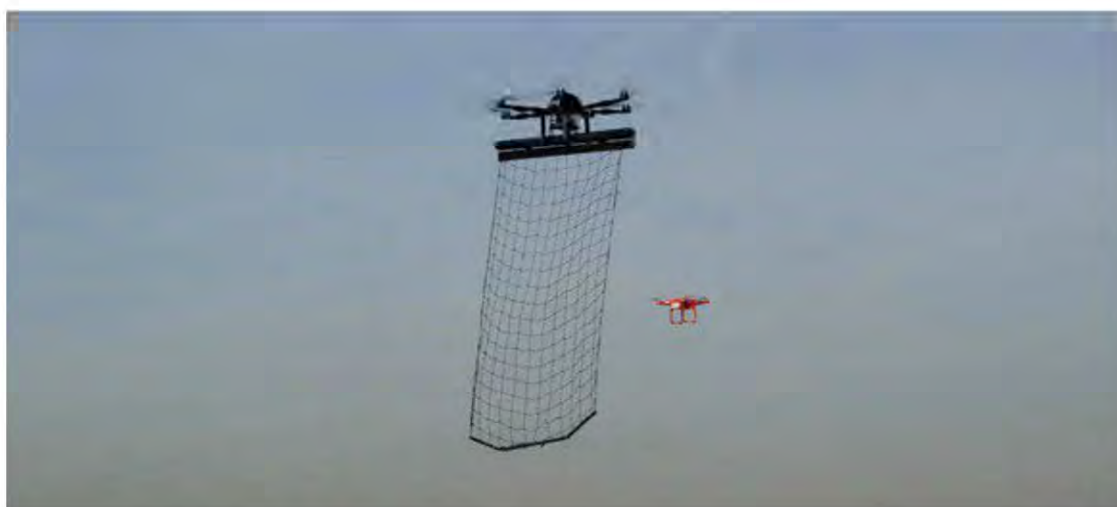


Figure 6-15. Le MPI 200 de Malou-Tech capturant un DJI Phantom

La même société commercialise un lance-filet portatif, qui ressemble à une grosse lampe torche. Le filet replié dans le manche est éjecté par une cartouche de gaz, à une vingtaine de mètres, de quoi tenir à distance de nombreux paparazzi télépilotes aux abords des stades ! De son côté, la police hollandaise essaie de dresser des aigles intercepteurs.



Figure 6-16. Le lance-filet Ground Interceptor de Malou-Tech

COMMENT DÉBUTER AVEC UN DRONE EN KIT ?

« Il est souvent nécessaire d'entreprendre pour espérer et de persévérer pour réussir. »

Gilbert Cesbron

Ce chapitre présente les outils et savoir-faire pour mener à bien le montage et les premiers vols d'un petit drone multiréacteur. Monter et faire voler un modèle simple de drone est à la portée de tous, sous réserve de respecter des règles minimales de sécurité : avec ses vis, boulons, entretoises et plaques, le châssis rappelle un jeu de Mécabo... Un Mécabo dans lequel passent des câbles et où s'emboîtent moteurs, circuits intégrés et batteries. Quelques chargements de logiciels, quelques réglages, et le drone peut voler !

Quelques précautions avant le montage

POUR NE PAS SE BLESSER

Un drone peut causer blessures et dégâts en vol mais aussi pendant sa construction. Il est recommandé d'avoir un plan de travail dédié, idéalement dans une pièce où enfants ou animaux n'ont pas accès : les vis, composants électroniques aux couleurs vives, les colles, peuvent présenter un certain attrait auprès des enfants, mais ils sont dangereux et on doit veiller à ce qu'ils ne soient pas tentés de les porter à leur bouche.

De plus, certains outils sont tranchants. Le fer à souder nécessite des précautions particulières : à 400 °C, il peut enflammer un grand nombre de matériaux. Avant de sortir un fer, il faut toujours ranger et nettoyer son plan de travail. Non utilisé, il doit reposer sur un support ignifugé, et de toute façon, ne doit jamais être laissé allumé sans surveillance. Il va sans dire que tous les liquides inflammables doivent être maintenus à l'écart.

En chauffant, l'étain prend une forme liquide et peut projeter des gouttelettes, qu'il ne serait pas bon de recevoir dans les yeux. Porter des lunettes protectrices est donc fortement recommandé. Les fumées d'étain sont toxiques, ce qui implique de bien aérer la pièce.

Toujours au chapitre incendie, il faut se méfier des batteries ou des circuits électriques mal isolés. Les batteries au lithium polymère sont puissantes et nous recommandons de les

retirer du drone au repos. À l'atelier comme sur le terrain, ayez toujours accès à une trousse de soins de secours, sait-on jamais...

POUR NE PAS GRILLER LES CIRCUITS

Nul besoin d'un doctorat en électronique pour connecter des fils à des circuits intégrés, mais il faut respecter les polarités, les limitations de tension et d'intensité. Un fil mal branché peut, au mieux, n'avoir aucun effet, mais au pire il peut sanctionner d'un petit bruit et d'une odeur de grillé une mise hors service définitive.

Avant d'alimenter un circuit, il faut connaître la tension de travail et vérifier le sens d'alimentation : sur un drone, il s'agit le plus souvent de 5 V, qui est la tension standard de sortie des contrôleurs. Les prises de servo comportent 3 fils : un fil noir correspondant au neutre, un fil rouge au milieu correspondant à l'alimentation et un fil clair correspondant au signal. Pour alimenter un circuit, le fil rouge et le fil noir suffisent. Pour envoyer un signal, seul le fil clair compte. Heureusement, le fil rouge est placé au centre de la prise, de sorte que même lorsque la prise est inversée, il n'y a pas de risque de griller un circuit. La batterie de vol (par exemple de 12 V) est branchée sur une plaque de distribution qui répartit la puissance entre les moteurs et comporte aussi une sortie en 5 V destinée à alimenter l'électronique de bord. Cette sortie supporte une intensité suffisante pour alimenter un récepteur ou un émetteur, mais il faut consulter la notice pour savoir si elle peut supporter des usages plus intenses, comme l'alimentation des servo d'une nacelle autostabilisée. Le cas échéant, il faut une alimentation séparée et équipée d'un régulateur de tension, qui contourne l'autopilote.

Les autopilotes sont généralement équipés de diodes et de témoins sonores qui indiquent la mise sous tension et le mode de vol en cours. Ensuite, il faut repérer les entrées et sorties de l'autopilote : les entrées reçoivent les signaux du récepteur radio et les sorties sont les signaux que l'autopilote envoie vers les moteurs, seuls, ou vers des servo reliés aux gouvernes et à la charge utile.

POUR NE PAS PERDRE DE PIÈCES

Un autre risque, beaucoup plus bénin mais néanmoins source de retards, est la perte de pièces. La plupart d'entre elles, notamment électroniques, ne sont pas standards. Leur délai de réception après commande peut nécessiter plusieurs semaines. Toujours les ranger dans des boîtes ou casiers à la taille adaptée et, si possible, étiquetés. L'achat d'une étiqueteuse n'est pas superflu car elle vous fera gagner du précieux temps de recherche.

Il ne faut pas hésiter à commander, en plus du kit d'origine, un lot de pièces de rechange, des câbles et des prises, car, vous le constaterez vous-même, les premiers vols risquent d'être « gourmands » en hélices, moteurs électriques, contrôleurs ou pièces de châssis. Lors d'un crash, des pièces sont souvent perdues. Les kits contiennent généralement tous les accessoires nécessaires. Il faut cependant disposer de quelques outils.



Figure 7-1. Une superposition de casiers, pour ne rien perdre !

Outils et savoir-faire requis

MONTAGE DU DRONE

Le montage se réalise manuellement avec des vis, le plus souvent de diamètre 2, 3 ou 4 mm. Des tournevis et clés hexagonales standards suffisent. Après vous être fatigué à visser et dévisser toute une journée, vous investirez sans doute dans une visseuse électrique. Dans ce cas, il faut veiller à ce qu'elle accepte le type de têtes de vis ou de clés que vous utilisez.

Le but du montage est d'assurer l'intégrité et la rigidité du châssis : rien ne doit se dévisser ni se désolidariser en vol ou au sol, sous l'effet des chocs et vibrations.

Lorsqu'on visse métal sur métal, il faut passer du frein filet, pâte de couleur bleue qui, contrairement à la colle, peut se retirer facilement en se cassant. Choisissez du frein filet « medium », et non du « hard », parce que ce dernier est presque impossible à retirer sur des petits diamètres.

Il faut aussi avoir de quoi saisir ces petites pièces : pinces d'électricien et brucelles (le dérivé professionnel de la pince à épiler). Les vis et écrous en aluminium sont deux fois moins lourds que l'acier et peuvent alléger de 5 % le poids total d'un drone prêt à voler. Pour les pièces qui ne sont pas en mouvement ou qui ne sont pas démontées souvent, l'aluminium est un bon substitut à l'acier. Les serre-câbles jetables, de toutes tailles, sont constamment utilisés, notamment pour fixer des composants sur les bras. Le ruban adhésif renforcé double face, appelé parfois « servo tape », est pratique pour fixer des éléments légers tels que capteurs et récepteurs, à condition qu'ils soient dans leur casing. Par sécurité, posez toujours un serre-câble en plus du ruban adhésif.

Une astuce pour éviter que les vis ne roulent à terre ou ne s'accrochent à vos manches : rangez-les sur le plan de travail par famille, dans des verres ou gobelets, et utilisez des tournevis aimantés.



Figure 7-2. Clés au centre ; boulons et vis (à gauche) ; entretoises (en bas) ; serre-fils (à droite)

CÂBLAGE ET SOUDAGE

Cette étape est celle qui nécessite le plus grand nombre d'outils.

Le câble est toujours un fil entre deux prises mâles ou femelles avec souvent un raccord soudé, pour lequel vous devez prévoir une pince à couper, un dénudeur et un cutter.

L'intensité du circuit va dimensionner le diamètre du câble et ses prises :

- pour de l'électronique, du câble et des prises de servo suffisent ;
- pour des câbles de puissance telles que ceux reliant la batterie, la plaque de distribution et les moteurs, il faut des diamètres et des prises conséquentes ; les prises mini dean (noires) supportent jusqu'à 10 A, les prises dean (rouges) jusqu'à une vingtaine, au-delà les prises XT60 (jaunes) s'imposent.

Les occasions de sortir la station de soudage ne manquent pas : le soudage est indispensable pour ajuster, par exemple, la longueur d'un câble ou changer une prise. La plupart des batteries sont encore vendues sans prises, pour laisser le choix d'installer des prises compatibles avec le reste du circuit. C'est pourquoi il faut à minima investir dans une station à température réglable. Ainsi, la même station peut servir à souder un fil de servo ou un câble de puissance. La pièce d'usure principale du fer, c'est la panne, dont il faut prévoir une gamme étendue et des rechanges. Ne pas oublier d'entourer le câble avant de souder par une gaine thermorétractable : maintenir les pièces à souder avec un étau, un bout de sparadrap ou une troisième main pour effectuer la soudure. Après la soudure, la chaleur d'une flamme de briquet sur la gaine fait l'affaire. Ces mêmes gaines peuvent servir de renfort pour protéger des fils aux abords de plaques aux arêtes coupantes. Il faut donc en prévoir de tous les diamètres et de couleur assortie avec le câble.



- Fer bon marché à température réglable (en haut à gauche)
- Station Weller avec son reposoir et un nettoyeur (boîte de limaille) (en haut au centre)
- Troisième main (en haut à droite)
- Pâte à étamer
- Lunettes protectrices
- Pincés coupantes, câble, prises
- Manches thermorétractables
- Briquet

Les circuits électriques du drone en vol vont être soumis aux vibrations du moteur (estimées à 200 Hz), à des accélérations de plusieurs *g* lors d'atterrissages brutaux et à des dilatations dues aux échauffements. Une soudure mal faite peut causer un court-circuit ou une coupure d'alimentation qui, irrémédiablement, induisent un crash. Le courant doit passer, par exemple, par la surface de contact entre les câbles (en les entreplaçant) et non pas par la soudure seule (qui est seulement un liant). La pâte à étamer (*rosin flux* en anglais) augmente l'adhérence des parties à souder, la répartition de l'étain et le flux d'électrons : il faut en étaler un peu sur les deux parties avant de passer l'étain ; ensuite, les résidus de pâtes sont retirés avec un chiffon humide. Une soudure réussie est brillante et lisse ; si elle est grise ou craquelée, c'est qu'elle est « recuite » et qu'il faut la refaire. En cas de doute, il est conseillé de la regarder à travers une loupe ou de réaliser un test de résistance avec un multimètre. Cet instrument est indispensable lorsqu'on veut s'assurer de l'absence de pont entre des soudures proches. Sur un circuit intégré, des prises de servo nécessitent des soudures, proches l'une de l'autre d'un millimètre.

Après chaque cession, la panne du fer à souder est nettoyée en la frottant sur une éponge humide d'électricien ou à l'aide d'un nettoyeur, qui est petite boîte contenant de la limaille.

Pour certaines applications spécifiques, telles que le soudage sur un circuit intégré, un fer classique ne suffit pas, même à puissance réglable, car la chaleur a tendance à être absorbée par la plaque, de sorte que la température du fer n'est pas constante. Il faut investir dans un fer à contrôle de température : ils sont munis d'une sonde qui maintient la température constante quel que soit l'usage. Un fer professionnel tel qu'un Weller peut dépasser les 400 € mais cet investissement peut s'avérer indispensable par exemple pour souder les fils des moteurs sur une plaque de distribution MikroKopter.

Terminer toujours par tirer un coup sec sur un câble fraîchement soudé pour en tester la solidité avant de « manchonner », passer la gaine thermorétractable puis à la chaleur de la flamme de briquet en la bougeant.

Vous l'avez compris, les soudures sur un drone doivent être irréprochables. Cela s'acquiert avec la pratique, et nous vous recommandons avant de souder sur un drone pour la première fois de vous entraîner un peu, en s'inspirant par exemples des nombreuses démonstrations sur YouTube.

INSTALLATION DE LOGICIELS

Plusieurs fois par an, les constructeurs et communautés de drones proposent des évolutions de logiciels et firmwares. Ces logiciels « embarqués » disponibles gratuitement sur Internet intègrent de nouvelles fonctionnalités, accompagnent l'intégration de composants et soignent les bugs des versions précédentes. Il est donc important d'avoir les dernières mises à jour et de participer aux forums de discussion des utilisateurs.

Pour mettre à jour un firmware ou effectuer des réglages et programmation, il faut relier l'autopilote à un PC, le plus souvent sous Windows. Les logiciels sont disponibles sur les sites Internet des constructeurs et des communautés. Le transfert des données a lieu via un port USB ou en Wi-Fi. Le port USB fournit à la fois des données et un courant suffisant pour alimenter des circuits intégrés, donc il n'y a normalement pas besoin de brancher la batterie de vol en plus. Un PC portable pourra être amené sur le terrain pour les réglages, la programmation et visualisation des vols sur fond cartographique.

Quel drone choisir ?

Vos premiers pas seront de vous initier à la construction et au pilotage, de prendre des premières photos et vidéos aériennes... C'est souvent de cette première expérience que naîtra ou non l'envie de continuer.

Pour bien débuter, il faut commencer petit (environ un kilo tout compris) : plus c'est petit et moins les dommages sont importants en cas de crash. Car il y en aura ! De plus, vous apprendrez plus vite à piloter, car la stabilité est proportionnelle à la taille. Il existe plusieurs options, selon que le télépilote souhaite ou non intégrer son propre matériel et envisage de progresser. Il est facile de commander sur Internet... y compris du matériel incompatible ou

mal adapté à votre besoin : n'hésitez pas à questionner le vendeur sur le site, pour tester son sérieux et sa compétence, ou à vous rendre dans des boutiques spécialisées (voir annexe A).

Tableau 7-1. Comparatif de quelques drones du marché

TYPE	MARQUE ET MODÈLE	GPS	POINTS FORTS	POINTS FAIBLES
Prêt à voler	Parrot AR Drone 2	Oui	Compatibilité avec iPhone et iPad	Absence de manettes Portée radio limitée
Prêt à voler	DJI Phantom	Oui	Design Prises de vue avec GoPro	Temps de vol court : 8 min Prix élevé
Prêt à voler	Horizon Hobby Blade 350 QX	Oui	Facilité de mise en œuvre	Fragilité et absence de GPS
	Gaui 330	Non	Facilité de mise en œuvre	Absence de GPS
Avec intégration de matériel	DJI F450	Oui	Très modulable	Absence de notice dans la boîte
Open Source	3DR Quad D avec APM	Oui	Très paramétrable Supporté par la plus grande communauté de drones Peut être agréé DGAC	Temps de montage et d'appropriation long Absence de notice dans la boîte

OPTION 1 : ACHETER DU PRÊT À VOLER

La télécommande et la charge utile sont intégrées dans ce cas. Il n'y a rien à construire : il suffit de lire la notice, recharger la batterie et décoller !

Ces drones de loisirs prennent des photos et vidéos dont la qualité s'améliore à chaque nouvelle version. Les plus connus sont le AR Drone de Parrot (environ 350 €), maintenant en version 2.0 ou le DJI Phantom, un best-seller. D'autres machines apparaissent chaque mois telles que le Horizon Hobby Blade 350 QX ou, très récemment, les drones de poche tels que le Hubsan X4 H107D (environ 150 €) ou le Lady Bird de Walkera.



Figure 7-4. DJI Phantom en pleine inspection

Ces machines volent bien, car les réglages ont été effectués en usine. C'est parfait pour le télépilote pressé qui pourra, à peu de frais, acquérir des notions de pilotage, tout en ramenant des photos à la maison. L'inconvénient est leur manque d'évolutivité : il n'est pas possible a priori de changer de télécommande ou de charge utile. De plus, il est impératif de s'approvisionner en pièces de rechange d'origine. Enfin, une utilisation professionnelle est exclue car l'autopilote ne comprend pas de dispositifs de limitation d'altitude et de distance. Légalement, ils ne peuvent pas être utilisés ailleurs que sur des terrains d'aéromodélisme ou en rase campagne.



Figure 7-5. Phantom aux hélices carénées



Figure 7-6. Horizon Hobby 350 QX bricolé avec une liaison vidéo et un GPS

OPTION 2 : INTÉGRER SON PROPRE MATÉRIEL

Si le pilote est déjà aéromodéliste (sur avions ou planeurs), il possède une radio et des batteries, ainsi qu'un petit appareil photo compact ou une GoPro, dont il veut se servir. Il souhaite aussi s'initier à la construction pour aller plus loin ensuite. Comme pour les « prêts à voler », une utilisation professionnelle est exclue.

Le Gaii 330 (quad de moins d'un kilo) a formé une génération de télépilotes. Il faut monter, câbler et procéder à quelques réglages : il n'y a pas de risque de se tromper car les branchements sont du « plug and play », sans soudure. Cette option offre une bonne initiation au fonctionnement d'un autopilote en repérant les entrées et les sorties. Il y a possibilité d'installer une nacelle pour un appareil photo mais, malheureusement, pas de GPS (comptez environ 350 € sans la radio).

Dans cette gamme, un cran au-dessus, on trouve la série F de DJI (F450), qui a l'avantage d'accueillir un GPS, et est munie des fonctions Position Hold et Retour à la maison (comptez environ 400 € sans la radio).



Figure 7-7. Un DJI F450 équipé d'une GoPro

OPTION 3 : UTILISER UN DRONE OPEN SOURCE

Un système à architecture open source est doté d'un code source rendu public : les programmeurs font bénéficier gratuitement de leurs travaux à une communauté de membres.

Le APM, autopilote open source sous Arduino, est supporté par la communauté DIY Drones.com de plus de 50 000 membres dont environ 1 000 en France. Le site dispose d'un blog et des forums de discussion très actifs, où chaque jour de nouveaux projets sont présentés, ainsi que toute l'actualité sur les drones.

Les kits sont fabriqués par la société californienne 3DR. Entièrement paramétrable et disposant d'un GPS, il est possible d'obtenir l'agrément de la DGAC (Direction générale de l'aviation civile) pour un usage pro. Sa mise au point va nécessiter des dizaines d'heures de montage, de soudage et de réglages. Comptez environ 500 € sans les batteries charge utile et radio. Nous allons vous montrer pas à pas le montage d'un petit quad équipé d'un APM.

construction d'un petit quad

ÉLÉMENTS CONSTITUTIFS DU QUAD

Le quad que nous avons sélectionné est le 3DR Quad D équipé d'un autopilote APM 2.0. L'ensemble prêt à voler aura une masse totale d'environ 1 kg. D'une conception un peu rustique (tube carré), il est composé d'un nombre réduit de pièces (seulement une quarantaine) et peut être facilement modifié.

Éléments d'un drone complet



Figure 7-8. Inventaire des éléments du drone

En bas :

- récepteur radio avec son satellite ;
- connexion Wi-Fi ;
- autopilote ;
- plaque de distribution.

Au-dessus avec les longs fils :

- moteurs ;
- contrôleurs ;
- batterie de vol (en vert).

Le reste constitue le châssis.

Seuls le récepteur, la batterie et des vis en aluminium ont été achetés séparément.

Il vous faudra une télécommande avec un minimum de 5 voies (4 voies pour le contrôle du vol aux manettes et une voie pour le contrôle des modes de vol), assignée à un interrupteur à plusieurs positions. Avec 8 voies, vous pourrez utiliser tous les modes de vols et, en plus, contrôler un appareil photo. La radio utilisée est la Spektrum 7S, de 7 voies en 2,4 GHz. Spektrum est une des premières marques à avoir proposé dès 2010 des radios équipées d'une liaison télémétrique descendante.

Il y a une liaison Wi-Fi, ce qui évite l'encombrement d'un câble USB pour les réglages au sol et s'avère indispensable pour la navigation cartographique et les réglages en vol.

Pour éviter des problèmes de compatibilité, il vaut mieux commander ensemble le châssis, les moteurs, les contrôleurs, les hélices, les fils et prises. Vous pourrez toujours acheter une batterie 4 000 mAh (capacité minimale) 3S dans une boutique de modélisme.

ÉTAPES DU MONTAGE

Étape 1 : assemblage des pieds et des moteurs



Figure 7-9. Assemblage des pieds et fixation des moteurs

Les moteurs sont fixés au bras par deux vis à serrer avec un peu de frein filet. Les câbles des moteurs, longs à l'origine d'une quarantaine de centimètres, peuvent être raccourcis à 20 cm, pour alléger le poids et réduire l'encombrement.

Étape 2 : montage de l'autopilote et de la plaque de distribution sur leurs supports

Il faut repérer les flèches désignant l'avant. On peut aussi s'aider de son propre marquage.



Figure 7-10. Autopilote et plaque de distribution montés

Étape 3 : mise en croix



Figure 7-11. Mise en croix, forme globale du drone

C'est à cette étape que le drone prend sa forme définitive : les bras sont pris en sandwich entre deux plaques boulonnées, dont celle du fond supporte la plaque de distribution. Assurez-vous bien que l'avant de l'autopilote coïncide avec l'avant de la carte de distribution et du châssis. L'avant de ce dernier est repérable aux deux bras bleus.

Étape 4 : premier allumage

Les contrôleurs sont accrochés sur le flanc de chaque bras par des serre-câbles. La batterie est fixée par une bande Velcro, sous la plaque inférieure.

ÉTAPES DU CÂBLAGE

Connecter les câbles de puissance

Connecter les trois câbles des moteurs aux contrôleurs, et les deux câbles de puissance et les fils de données des contrôleurs vers la plaque de distribution.

Connecter les câbles de contrôle

En entrée de l'autopilote, il faut brancher :

- les fils correspondant à chaque voie du récepteur, c'est-à-dire au minimum les cinq fonctions : lacet, roulis, tangage, gaz, modes de vol ;
- un câble composé d'un fil rouge et un fil noir ; ce câble alimente sous une tension de 5 V l'ensemble de l'électronique de bord (autopilote, récepteur, liaison Wi-Fi...) ;

Attention

Bien respecter les polarités et effectuez les bons branchements, sous peine de mise hors service !

- en sortie de l'autopilote, un câble à 4 fils multicolores, qui est le câble de contrôle des moteurs, en respectant l'ordre des moteurs.

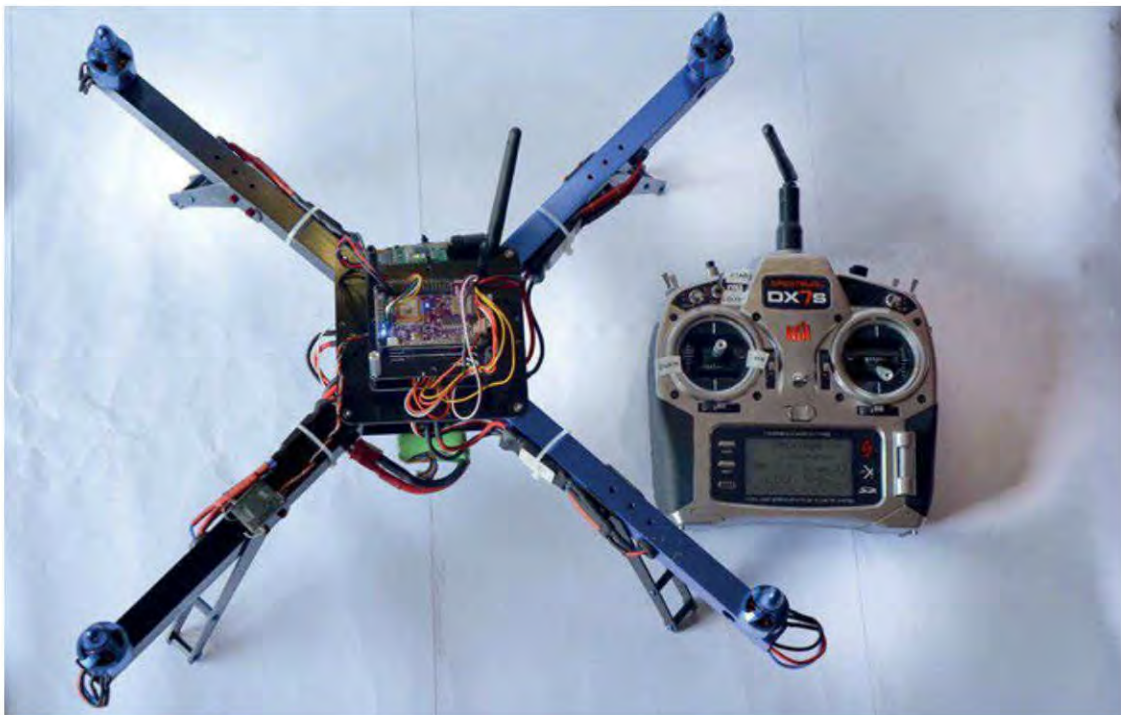


Figure 7-12. Montage et câblage du drone réussis

La liaison Wi-Fi dispose d'une fiche située près des sorties.

Tout est câblé, il suffit de brancher la batterie et de s'assurer que l'ensemble est correctement alimenté. Tous les essais sont réalisés en ayant retiré les hélices, sécurité oblige. À la mise sous tension, les moteurs doivent émettre quelques bips et les diodes du récepteur de l'autopilote et de la liaison Wi-Fi s'allumer.

Chargement de logiciels

L'application Mission Planner sous Windows est téléchargeable gratuitement. Une fois qu'elle est ouverte, reliez le PC et l'autopilote via un port USB et chargez l'autopilote de son firmware Arducopter.



Figure 7-13. Chargement de l'application sur Internet

Une connexion filaire est préférable à une connexion Wi-Fi pour la mise à jour des firmwares, parce que le débit est souvent bien supérieur, mais pour les réglages au sol ou en vol, le Wi-Fi suffit.

Pour s'assurer que le PC et l'autopilote communiquent, il suffit de bouger le drone : l'horizon artificiel à l'écran doit bouger et dans le bon sens. Mettez le drone à la fenêtre et assurez-vous que le GPS fait apparaître une position. La carte au centre de l'écran montre le drone dans l'environnement Google Earth de votre quartier.

Il faut spécifier le type de châssis utilisé : le logiciel en supporte un grand nombre, du quad à l'octocoptère en passant par des formes plus exotiques. Pour ce qui nous concerne, nous spécifions un quad dont l'avant correspond au centre des deux bras de couleur bleue.

Calibrages radio, compas et accéléromètre

Ils s'effectuent en ouvrant les onglets correspondants.



Figure 7-14. Tous les moteurs tournent dans le bon sens : la machine volante est prête !

■ Calibration de la radio

En bougeant les manettes, les curseurs des fonctions à l'écran doivent bouger dans le bon sens. L'autopilote enregistre les positions maximales et minimales des manettes en butée. Si un curseur bouge dans le mauvais sens, il faut inverser la course des servo depuis l'émetteur.

■ Calibration de l'accéléromètre et du compas

Cette manipulation consiste à faire pivoter le drone sur chacun de ses axes dans une séquence déterminée. Reportez-vous à la vidéo du site.

Ultimes vérifications

Il faut maintenant s'assurer que les moteurs tournent dans le bon sens.

Pour éviter des démarrages intempestifs, il existe un dispositif de sécurité qui n'arme les moteurs que lorsque les manettes de l'émetteur sont sur lacet plein à droite et gaz minimal pendant 5 s. Moteurs armés, les diodes de l'autopilote arrêtent de clignoter pour rester solides. On augmente un cran de gaz et les moteurs vrombissent. Si un moteur tourne dans le mauvais sens, il suffit d'invertir deux fils du moteur vers le contrôleur.

Il ne reste plus alors qu'à installer les hélices, en s'assurant que leur pas correspond au sens de rotation.

Premiers vols du drone

Une fois que vous avez passé des jours, peut-être des semaines, de préparation entre Internet, l'atelier et les boutiques, votre machine est fin prête. Vous avez beaucoup appris sur son fonctionnement et les vidéos de vos prédécesseurs vous font envie. Idéalement, vous êtes déjà licencié de la Fédération française d'aéromodélisme (FFAM, voir annexe A). Dans ce cas, vous allez certainement bénéficier de l'aide des autres membres : voler sur un terrain adéquat et surtout bénéficier de l'assurance responsabilité civile disponible sur : www.ffam.asso.fr.

Cette assurance couvre les éventuels dommages corporels et matériels que vous pourriez provoquer aux autres ou à vous-même, si vous vous blessez.



Figure 7-15. Faire voler un drone n'est pas sans risque !

CONSIGNES DE SÉCURITÉ SPÉCIFIQUES

Pour les premiers vols, choisissez un endroit d'au moins la taille d'un terrain de foot, sans obstacle ni public car une voilure tournante peut partir dans n'importe quelle direction. Il est préconisé d'obtenir du propriétaire du terrain une autorisation. Attendez un jour de vent faible ou nul : une éventuelle dérive du drone ne sera due qu'à un mauvais réglage et non au vent ; le matin est presque toujours le meilleur moment.

Soyez accompagné d'un « assistant » pour écarter d'éventuels curieux, surtout quand vous êtes aux commandes. Sur un terrain isolé, gardez à portée de main une trousse de secours (ce n'est pas un luxe).

APPRENDRE À PILOTER

Nous allons expliquer maintenant comment bien entreprendre vos essais de pilotage pour que vos efforts ne s'avèrent pas infructueux.

1. Placez le drone face au vent de sorte qu'il vous le ramène quoi qu'il arrive.
2. Commencez par mettre quelques crans de gaz sans le faire décoller. Bougez les manettes : vous sentez ainsi si les commandes sont dans le bon sens. Le cas échéant, il faut inverser le sens des servo depuis la télécommande.
3. Montez franchement les gaz, puis stabilisez à 2 m de hauteur, la hauteur minimale pour éviter les remous provoqués par le souffle des hélices. La première difficulté est de trouver le point d'équilibre des gaz au cran près pour maintenir l'altitude, idéalement à mi-course de la commande des gaz. Le cas échéant, ajustez la courbe des gaz depuis la télécommande : un drone bien réglé doit se stabiliser en lâchant les manches.



Figure 7-16. Premier vol sur un terrain d'aéromodélisme balisé

4. Contrez la dérive, dans un premier temps avec les manettes, puis compensez-la de façon permanente avec la modification du retour au neutre des commandes. La compensation est assurée par les commandes crantées, appelé « trim ». Le drone doit être stationnaire en lâchant les commandes. Dès qu'il s'écarte trop, posez aussitôt l'appareil en réduisant les gaz, allez le récupérer et recommencez. Après quelques séances, vous serez à l'aise pour effectuer un vol stationnaire.
5. Il est maintenant temps pour vous de tenter d'effectuer quelques translations (mouvement latéraux ou frontaux sans toucher au lacet) en revenant toujours vers le centre.
6. Essayez de réaliser un lacet en alternant gauche et droite. Puis combinez le lacet et la marche avant. Essayez de tracer des lignes parallèles toujours devant vous.
7. Faites de même lorsqu'il revient face à vous : il s'agit d'une manœuvre délicate car, vent dans le dos, il prend de la vitesse et les commandes sont « inversées ». Prenez le temps de maîtriser le contrôle des trajectoires, entrecoupées si besoin de vols stationnaires. Surtout, ne le laissez pas monter au-delà de 10 m ou s'éloigner. Petit à petit, vous prendrez conscience de son inertie : après une prise de vitesse, il peut lui falloir quelques dizaines de mètres, commandes au neutre, pour ralentir avant de redevenir stationnaire. Vous comprendrez aussi que mettre du manche en sens inverse le ralentit avant de le faire partir en arrière. Ceci est vrai dans toutes les directions. Tout est donc une question de dosage et d'anticipation.
8. Après quelques vols, vous vous essayerez aux virages. Il faut combiner prise de vitesse (manche avant), roulis (20 à 30 degrés d'inclinaison) et lacet. Cela demande une forte concentration au début, mais quel régal !



Figure 7-17. Prise d'altitude à 10 m : attention à ne pas le laisser trop monter.

Après quelques dizaines de vols, vous vous sentez à l'aise dans le pilotage de votre drone. Il est temps d'essayer différents modes de vol :

- maintien d'altitude : pour soulager les nerfs de devoir constamment contrôler l'altitude en jouant sur les gaz ;
- maintien de la position : le vol stationnaire ; quand il y a du vent, il aura tendance à osciller en s'écartant et revenant à l'endroit désiré, le plus souvent en marquant des cercles ;
- retour à la maison : d'un simple clic, le drone revient à son point de départ. C'est si pratique pour éviter une perte au loin.



Figure 7-18. Le public semble apprécier !

RÉGLAGE DES GAINS

Après les premiers vols, le télépilote trouvera sans doute le drone trop ou pas assez stable. Pour y remédier, il suffit de modifier les gains.

Ces derniers déterminent la vitesse, la puissance et le temps de réaction de l'autopilote entre une valeur prescrite (une action sur une commande, la désignation d'une position GPS à atteindre) et une valeur réelle (son attitude sur un axe, sa distance à la position GPS) : plus les gains sont élevés, plus le drone est manœuvrant et instable. Cela règle aussi la capacité du drone à reprendre une assiette stable dès que les manches sont lâchés.

Ils sont décomposés en gain proportionnel (P), intégral (I) ou dérivé (D).

- Le P correspond à la puissance de réaction. Imaginons par exemple que le drone soit relié à la position GPS à atteindre par un élastique : un élastique peu tendu aura du mal à agir sur le drone, tandis qu'un élastique très tendu projettera le drone au-delà de sa cible.
- Le I correspond au temps de réaction : plus l'écart à la cible est significatif, plus la réponse est forte.
- Le D correspond à la vitesse de réaction, par exemple le changement d'assiette.

Les gains sont à régler pour chaque drone en fonction de la répartition des masses et du centre de gravité du châssis ou du poids complet de l'appareil avec la charge utile. Ils dépendent aussi du type de vol qu'on souhaite ; par exemple, des gains élevés pour réaliser des loopings, mais faibles si on veut filmer en douceur. Ils peuvent aussi être modifiés en fonction de la météo, pour mieux contrer l'effet du vent, au prix d'une plus grande instabilité. Un drone aux gains trop forts risque de vouloir atteindre une position GPS en effectuant autour de la position des cercles de rayon toujours plus petit et en prenant de la vitesse, comme s'il était pris dans un tourbillon. Dans ce cas, il faut aussitôt interrompre le mode de vol « maintien de la position » et abaisser le gain.

Ces réglages peuvent être effectués au sol, mais pour en apprécier l'efficacité, il vaut mieux les entreprendre en vol. Il est en effet possible d'assigner un gain à une molette de la télécommande ou de modifier ces valeurs depuis un PC ou un smartphone via une connexion Wi-Fi.

Les autopilotes offrent des possibilités de réglages plus ou moins fins, allant d'un simple « tout ou rien = vol acrobatique ou vol stable » sur les machines prêtes à voler, jusqu'à la possibilité d'entrer des valeurs au centième près en P, en I et en D sur l'APM.

POURQUOI LE DRONE NE VOLE-T-IL PAS OU MAL ?

C'est au cours des premiers vols que les problèmes de montage ou de paramètres arrivent au grand jour. Il s'agit le plus souvent de problème de connexion ou d'alimentation. Plusieurs causes peuvent avoir les mêmes symptômes. Il faut émettre des hypothèses et les vérifier une à une. Réaliser des tests avec des composants de remplacement neufs permet aussi de gagner du temps. Pour l'exercice, imaginons que les vols ont lieu par un jour sans vent et que les batteries ont été rechargées.

Tableau 7-2. Solutions aux principaux problèmes rencontrés

PÉRIMÈTRE	SYMPTÔMES	HYPOTHÈSES	ACTIONS
Démarrage	Aucun moteur ne démarre.	La commande des gaz n'est pas sur le bon canal.	Vérifier que la commande des gaz est bien sélectionnée.
		Les moteurs n'arment pas.	Calibrer la radio : s'assurer que les valeurs atteignent le minimum et le maximum prescrits.
		Batterie à plat	Vérifier l'état des batteries.
	Un ou plusieurs moteurs ne tournent pas.	Le drone n'étant pas à plat, le moteur situé en amont ne démarre pas.	Mettre le drone à plat.
		La chaîne autopilote-ESC-moteur est défectueuse.	Vérifier l'arrivée de courant avec un voltmètre, ou réaliser un test avec un autre moteur, ou ESC. Remplacer l'élément défectueux.
		Le type de drone sélectionné dans l'autopilote ne correspond pas à celui employé.	Vérifier.
Vol	Le drone se retourne au décollage.	Moteur obstrué	Des herbes peuvent s'être enroulées, nettoyer.
		Une hélice horaire mise à la place d'une hélice antihoraire et vice versa.	Remplacer l'hélice.
		Un moteur tourne dans le mauvais sens.	Invertir 2 câbles sur 3 entre l'ESC et le moteur, ou inverser le sens depuis le logiciel.
			Vérifier si le moteur est relié à la bonne sortie de l'autopilote.
			Vérifier si le type de drone a été correctement sélectionné dans le logiciel de vol.

		L'autopilote est mal installé.	Vérifier qu'il est installé dans le bon sens, sans jeu et protégé des vibrations.
Le drone est instable.	Le PID n'est pas adéquat.	Vérifier.	
	Les commandes sont trop sensibles : le pilote surréagit.	Régler la courbe de course des servos depuis la télécommande : mettre des exponentiels pour adoucir les actions près du neutre.	
	Le châssis n'est pas rigide.	Vérifier l'intégrité de la structure, serrer les vis.	
	La batterie s'est épuisée.	Vérifier l'état de la batterie.	
	Le drone est en surcharge.	Vérifier le poids.	
Le drone part dans la mauvaise direction.	Commandes inversées	Inverser la course des servos depuis la télécommande.	
Le drone part dans une direction et ne peut être ramené.	Drone déséquilibré	Vérifier l'équilibre. Le cas échéant, déplacer des composants du drone.	
Le Position Hold ne tient pas.	Peu ou pas de réception GPS	Vérifier le nombre de satellites et la puissance du signal GPS.	
	Le drone effectue des cercles concentriques.	Calibrer le compas. Vérifier le PID.	
L'Altitude Hold ne tient pas.	Surcharge	Vérifier le poids et/ou modifier la courbe des gaz.	
	La batterie s'épuise.	Vérifier.	
	L'accéléromètre est perturbé.	Calibrer l'accéléromètre.	
	Le compas est perturbé.	Calibrer le compas.	
Charge utile	Pas de retour vidéo	L'émetteur vidéo et le récepteur ne sont pas sur le même canal.	Modifier la fréquence de réception en utilisant les interrupteurs.
		Batterie de la caméra à plat	Vérifier.
		La chaîne : prise HDMI-convertisseur numérique vers analogique-émetteur vidéo, est défectueuse ou mal alimentée.	Vérifier la connexion et l'alimentation.
	Image instable	Vibrations du ou des moteurs	Vérifier l'état des isolateurs de la nacelle et équilibrer les hélices.
	La caméra n'arrive pas à garder une position stable de haut en bas.	La caméra n'est pas fixée sur son centre de gravité.	Vérifier que la caméra est fixée sur son centre de gravité.

Il reste les problèmes dus aux bugs de logiciels. Une simple remise en route peut tout résoudre. Sinon, consultez le constructeur ou les forums d'utilisateurs.

En mettant en œuvre un drone open source, vous avez développé des connaissances et acquis une rigueur dans vos travaux de câblage, soudage et montage. Vous vous êtes équipé des matériels nécessaires ainsi que de l'outillage adéquat, puis avez rencontré, en clubs ou sur des forums, d'autres passionnés qui vous ont aidé et peut-être inspiré. Un jour, peut-être, envisagerez-vous de passer au stade professionnel...

Le nombre de drones civils professionnels explose malgré des performances encore limitées et une réglementation restrictive, bien qu'en cours de révision. Le potentiel immense d'utilisations et la faible barrière à l'entrée ont conduit de nombreuses petites sociétés à rejoindre ce secteur, principalement comme opérateurs. L'absence d'accidents graves (contre des aéronefs ou des personnes au sol), qui auraient arrêté d'un coup cet élan, montre que les risques sont maîtrisés. Cependant, peu d'opérateurs font véritablement des profits, la concurrence s'exacerbant et le marché tardant à s'ouvrir. Le marché est fragmenté en multiples niches spécifiques à une utilisation donnée. Et les investisseurs semblent avoir plutôt privilégié les constructeurs, désormais concentrés entre quelques acteurs de taille mondiale, avec un fort pouvoir d'influence.

Le marché ne décollera vraiment qu'avec l'autorisation des vols hors vue, encore à l'état d'expérimentation. Cela suppose que les drones s'intègrent dans le trafic aérien et que les personnes au sol puissent être survolées. C'est pourquoi il est impératif de rendre les machines plus fiables et robustes (dispositif de « voir et éviter », liaison de contrôle durcie, certification des drones et des logiciels), et d'avoir des équipages qualifiés. Des progrès techniques sont accomplis chaque mois : centrales inertielles désormais suffisamment précises pour se passer de GPS, détecteurs d'obstacles, etc. Par ailleurs, la labellisation des centres de formation va dans le bon sens.

Ces drones feront-ils de l'ombre à l'aviation habitée ? Il serait réducteur de le croire... Au contraire, les avions commerciaux profiteront certainement des automatismes en cours de développement sur les drones, comme la mise en œuvre d'un atterrissage automatique en cas de malaise du pilote. De la même manière, l'ensemble des véhicules, drones compris, bénéficieront des travaux en cours sur la voiture sans chauffeur. Paradoxalement, le drone en tant que véhicule s'efface dans la chaîne de valeur créée : aujourd'hui, ce qui compte aux yeux des clients, c'est la qualité des données produites.

RESSOURCES UTILES

Constructeurs

3D Robotics

États-Unis

Aibotix

Allemagne

Airbus Group

Europe

Ascending Technologies

Allemagne

Delair-Tech

France

Delta Drone

France

DJI

Chine

Fly-n-Sense

France

Freefly

États-Unis

Infotron

France

MAVinci

Allemagne

Microdrones

Allemagne

■ MikroKopter

■ Allemagne

■ Novadem

France

Parrot

France

senseFly

Suisse/France

Trimble

États-Unis

WorkFly

France

Opérateur

DRONEA

Exploitant européen leader du suivi de chantiers et de l'inspection d'ouvrages par drone. Présent sur les plus grands chantiers, comme ceux de construction de centrales électriques.
www.dronea.fr

Forums de discussion

DIY Drones

<http://diydrones.com>

HelicoMicro

<http://www.helicomicro.com>

MikroKopter

<http://forum.mikrokopter.de>

RCGroups

<http://www.rcgroups.com/forums/index.php>

Organismes

Fédération professionnelle du drone civil (FPDC)

<http://www.federation-drone.org>

Fédération française d'aéromodélisme (FFAM)

<http://www.ffam.asso.fr>

Direction générale de l'aviation civile (DGAC)

<http://www.developpement-durable.gouv.fr/-drones-aeronefs-telepilotes-.html>

UVS International

<http://uvs-international.org>

Association mondiale rassemblant les constructeurs de drones

Pôles de compétitivité aéronautique

ASTech (Paris)

Pégase (Aix-en-Provence)

Aerospace Valley (Toulouse et Bordeaux)

Revendeurs

Altigator

<http://www.altigator.com>

Azur Modélisme

<http://www.azurmodelisme.com>

34 avenue de la République 75011 Paris

01 48 05 44 40

Drone Volt

<http://www.dronevolt.com>

14 rue de la Perdrix 93420 Villepinte

01 80 89 44 44

Flash RC

<http://www.flashrc.com>

ZAC Centre, 13 rue Martin-Luther-King 38400 Saint-Martin-d'Hères

04 76 01 05 23

Mini Planes

<http://www.miniplanes.com>

02 53 35 51 16

Euro Model

<http://www.euromodel-online.eu>

Galerie marchande Gamma 193 rue de Bercy 75012 Paris

08 21 23 33 23

Studiosport

<http://www.studiosport.fr>

16 rue de l'Écureuil 76000 Rouen

09 80 86 54 12

D3E Electronique

<http://www.d3e.fr>

Revendeur du Trimble X100 en France

Salons

UAV Bordeaux

Biannuel (en septembre)

Salon international de l'aéronautique et de l'espace (Salon du Bourget)

Biannuel

Plus grand salon aéronautique du monde

Drones-Days

Annuel (en mars, à Bruxelles)

Drone Experience

Annuel (en septembre, à Nantes)

Intergeo

Annuel (change de ville chaque année, en Allemagne)

Plus grand salon européen de technique géographique

Eurosatory

Annuel (en juin, à Villepinte)

Salon de l'armement terrestre

UAV-G

Annuel (change de ville chaque année, en Europe)

Salon de la géomatique et des drones, organisé par des universités

Toys Fair

Annuel (en février, à Nuremberg)

Plus grand salon européen de modélisme

Livres

Frédéric Botton, *Les drones de loisir*, éditions Eyrolles, 2016, 224 p.

Paul Gerin Fahlstrom et Thomas James Gleason, *Introduction to UAV Systems*, Wiley, 2012, 280 p.

Océane Zubeldia, *Histoire des drones*, éditions Perrin, 2012, 238 p.

Randal W. Beard et Timothy W. McLain, *Small Unmanned Aircraft – Theory and Practice*, Princetown University Press, 2012, 352 p.

Michel Kasser et Yves Egels, *La photogrammétrie numérique*, éditions Lavoisier, 2001, 379 p.

Plamen Angelov (sous la direction de), *Sense and Avoid in UAS – Research and Applications*, Wiley, 2012, 384 p.

Magazines

Drone Multirotor Magazine, bimestriel : c'est le premier magazine de l'univers des drones.
www.dronemultirotormag.com

Hélico RC, bimensuel

Modèle magazine, mensuel

RC Pilot International, mensuel

Air et Cosmos, hebdomadaire

ACTION CAMERA

Caméra vidéo/appareil photo de taille très compacte, permettant de filmer les sports d'action et équipée d'une optique du type « fish-eye » à très grand-angle. La caméra GoPro est la charge utile la plus utilisée sur des drones.

AÉROMODÈLE

Drone de loisir au sens de l'arrêté du 11 avril 2012. Il ne peut être utilisé que hors agglomération, et de préférence sur un terrain d'aéromodélisme. Il ne convient pas pour du travail aérien.

ALTITUDE DE VOL

Hauteur de vol par rapport au niveau de la mer.

ATTESTATION DE CONFORMITÉ AU TYPE

Attestation délivrée par le constructeur d'un drone prouvant que ce dernier est autorisé en France. L'exploitant fournit en outre une attestation de conformité, déclarant que le drone n'a pas été modifié.

AUTOPILOTE

Abréviation de pilote automatique. Composant qui assure la stabilisation et la navigation du drone en s'appuyant sur des capteurs d'altitude, de vitesse, d'accélération et un signal GPS.

BATTERIE LITHIUM POLYMÈRE

Batterie la plus utilisée sur les drones civils, caractérisée par une forte densité énergétique et un taux de décharge élevé. Elle est constituée de plusieurs cellules de 3,6 V chacune. La tension ne doit pas descendre en dessous de 3 V par cellule, au risque d'une détérioration.

BRUSHLESS, MOTEUR

Moteur triphasé sans balais. Il se caractérise par une forte puissance, l'absence de nécessité d'entretien et un rendement de près de 90 %.

CALCUL DE CUBATURE

Extraction de volume à partir d'une modélisation 3D de terrain.

CERTIFICAT THÉORIQUE D'APTITUDE AVION, PLANEUR OU ULM

Attestation de réussite d'un examen composé de questions à choix multiples en relation avec la météo, la mécanique de vol, la navigation et la réglementation.

CHARGE UTILE

Objet transporté par le drone nécessaire à la mission. Il s'agit le plus souvent d'un appareil photo.

COMPAS

Indicateur du Nord magnétique. Il peut être perturbé par l'effet magnétique du courant continu de la batterie principale.

CONTRAROTATIF

Hélicoptère se caractérisant par l'absence de rotor anticouple. Deux rotors superposés tournant en sens inverse assurent à la fois la portance et l'anticouple.

CONTRÔLEUR DE VITESSE

En anglais, *Electricity Speed Controller*. Composant de bord transformant le courant continu de la batterie de vol en courant alternatif triphasé vers un moteur brushless. Il détermine la vitesse de rotation du moteur en modulant le nombre de pulsions par seconde. Il y en a un par moteur.

DÉCOLLAGE ET ATERRISSAGE AUTOMATIQUES

Correspond aux séquences automatiques de vol suivantes :

- pour un drone à voilure tournante : une montée verticale puis un vol stationnaire à 2 m de hauteur. L'atterrissage est une descente à vitesse réduite suivie d'un arrêt des moteurs au touché ;
- pour un drone à voilure fixe : une montée au meilleur angle. Le circuit d'atterrissage est composé d'un retour à la maison, d'un vent arrière, d'un vent traversier puis d'une finale avec arrêt du moteur avant de toucher le sol.

DÉRIVE

Écart à un plan de vol ou à une position stationnaire, dû au vent ou à l'absence de réception GPS.

DGAC

Direction générale de l'aviation civile. Régule toutes les activités aériennes en France.

DISTANCE DE VOL

Distance entre le télépilote et le drone. Elle est limitée à 100 m dans les scénarios de vol S_1 et S_3 , et 1 000 m dans le scénario S_2 . La distance de vol du scénario S_4 , hors vue, est autorisée au cas par cas.

DOSSIER TECHNIQUE

Document, accompagné de schémas, décrivant un drone de construction amateur et notamment ses dispositifs de sécurité. L'exploitant le soumet à la DGAC.

DRONE

De l'anglais *drone*, faux-bourdon. Il désigne familièrement tout aéronef sans pilote à bord.

EXPLOITANT (OU OPÉRATEUR)

Société, organisme ou particulier, responsable de l'exploitation d'une flotte de drones.

FIRMWARE

Logiciel intégré dans tout appareil électronique. Le firmware de l'autopilote, de la radio-commande ou de l'appareil photo est régulièrement mis à jour pour bénéficier de nouvelles fonctionnalités et d'améliorations.

FORCE AÉRODYNAMIQUE

Portance, traînée ou traction résultant de l'action du vent sur une voilure.

GPS (GLOBAL POSITIONING SYSTEM)

Système de positionnement satellitaire d'une précision d'environ 10 m à l'horizontal et en vertical. Il nécessite d'avoir une vision du ciel non obstruée : il fonctionne mal en forêt ou en ville, et pas du tout à l'intérieur d'un bâtiment.

GTA (GENDARMERIE DU TRANSPORT AÉRIEN)

Bras armé de la DGAC, chargé de faire respecter la réglementation aérienne.

HAUTEUR DE VOL

Hauteur du drone par rapport au sol. Elle est limitée à 150 m afin d'assurer la séparation avec la majorité des aéronefs volant au-dessus. En montagne, la hauteur de vol peut être de 100 m mais l'altitude de plusieurs milliers de mètres.

HEXACOPTÈRE

Drone à 6 rotors.

IMMERSION, VOL EN

Façon de télépiloter en visionnant le retour vidéo en direct émis depuis le drone. Il n'est autorisé que si un observateur visuel garde le visuel direct sur le drone.

INSPECTION D'OUVRAGES PAR DRONE

Activité consistant à faire voler un drone à proximité d'un ouvrage d'art, généralement en hauteur, pour en prendre des photos haute définition et détecter d'éventuels défauts.

LATENCE

Temps mis entre la capture d'image à bord et son visionnement sur la station de contrôle au sol. Si ce temps dure plus d'une seconde, il est difficile de diriger une charge utile ou de télépiloter en se servant du lien vidéo seul.

LIDAR

Abréviation de *Light Detection and Ranging*. Sorte de radar qui, au lieu de fonctionner avec des ondes radio, utilise la lumière visible ou infrarouge. Il permet de créer une modélisation en trois dimensions.

MANUEL D'ACTIVITÉ PARTICULIÈRE

Document écrit par l'exploitant selon une trame type, où sont décrits l'organisation, la composition de la flotte, les scénarios de vol et les modes opératoires. Il est soumis pour approbation à la DGAC.

MODE DE VOL

Par ordre d'automatisation croissant : vol manuel, stabilisé, maintien d'altitude, maintien de position, retour à la maison, décollage automatique, atterrissage automatique, atteinte de points de passage.

MODÈLE NUMÉRIQUE DE SURFACE

Représentation 3D d'un terrain obtenue par photogrammétrie ou Lidar. Après suppression des obstacles artificiels et de la végétation, elle permet d'obtenir un modèle numérique de terrain d'où sont extraites des courbes de niveau.

NACELLE GYROSTABILISÉE

Support à 1, 2 ou 3 axes destiné à assurer le contrôle et la stabilisation de la caméra. Les nacelles les plus performantes sont équipées de moteurs brushless.

OCTOCOPTÈRE

Drone à 8 rotors.

ORTHOPHOTO

Image haute définition plate et géoréférencée. Elle est obtenue par photogrammétrie.

PHOTOGRAMMÉTRIE

Procédé photographique consistant à réaliser une mosaïque de photos avec un taux de recouvrement constant et selon une certaine orientation. La photogrammétrie permet de créer une orthophoto et un modèle numérique de surface d'où peuvent être extraites des mesures de distance et de volume.

PITOT, TUBE

Tube placé sur le bord d'attaque d'un drone à voilure fixe et relié à un capteur de pression pour mesurer la vitesse air. Il fonctionne en déterminant la différence entre la pression ambiante (statique) et la pression dynamique (vent que crée le drone en avançant).

POINT DE CONTRÔLE (OU POINT DE CALAGE)

Cible visible du ciel, généralement une planche blanche fixée au sol et marquée d'une croix. Les coordonnées géographiques précises de la cible constituent une donnée d'entrée au traitement photogramétrique. Pour améliorer la précision, les cibles doivent être réparties uniformément sur la zone de travail.

QUADROCOPTÈRE (OU QUAD)

Drone à 4 rotors.

RECONNAISSANCE

Mission nécessitant un faible temps de présence sur un objectif, pour en obtenir un état instantané.

SCÉNARIO DE VOL

Scénario S_1 , S_2 , S_3 , ou S_4 de l'arrêté du 11 avril 2012 définissant hauteurs, distances, poids du drone et type d'environnement (peuplé ou non peuplé) à respecter.

SERVOMOTEUR (OU SERVO)

Moteur actionnant les gouvernes ou une nacelle. Il est constitué d'un moteur électrique, d'un potentiomètre et d'un engrenage destiné à démultiplier la force.

SIG (SYSTÈME D'INFORMATION GÉOGRAPHIQUE)

Logiciel de visualisation 3D et de calcul de volume.

SIMULATEUR DE VOL

Logiciel ayant pour fonctions :

- l'apprentissage du pilotage ;
- la visualisation des trajectoires d'un vol préprogrammé pour vérifier s'il respecte les limites de hauteur et de distance.

SURVEILLANCE

Mission nécessitant une présence longue (appelée permanence) sur un objectif pour déceler l'évolution d'une situation.

TÉLÉPILOTE

Pilote de drone.

VOILURE FIXE, DRONE À

Avion, planeur ou aile volante dont la portance est créée par le vent produit par le drone en avançant. Capable de planer moteur coupé.

VOILURE TOURNANTE, DRONE À

Multiroror ou hélicoptère dont la portance est créée par le rotor en tournant. Capable de vol stationnaire.

WINGTIP

Extrémité d'aile verticale permettant d'augmenter la précision et le maintien de l'altitude des ailes volantes en virage.

X, AXE

Longitude.

Y, AXE

Latitude.

Z, AXE

Hauteur.

360° 108

A

actionneur 47
 activité particulière 130
 Adobe Lightroom 107
 Adobe Premiere 108
 Aeryon Scout 13
 Aibotix X6 41
 aile
 battante 37
 profil (de l') 69
 souple 36
 volante 26
 ailerons 73
 Air Innov 55
 alarme 65
 altitude 132
 Amazon 127
 APM 43, 155
 ArcGIS 118
 AR Drone 130, 153
 assurance responsabilité civile 132
 atterrissage automatique 87
 attestation de conception type 131
 autopilote 42
 autorotation 72

B

batterie de vol 49
 bord d'attaque 69

C

cadreur 95, 108
 calculateur 46
 calcul d'un volume 120
 caméra infrarouge 109
 capteur
 de mesure de distance 46
 de pression 43

catapulte 63
 certificat
 de navigabilité 130
 théorique d'aptitude 131
 charge utile 54
 cible 115
 circuit d'atterrissage 88
 commande de profondeur 73
 compas digital 43
 contrôleur brushless 50
 courbe de niveau 118

D

déclaration d'activité de photographie et de
 cinématographie aérienne 132
 déclenchement à distance 103
 décollage automatique 87
 décrochage 71
 Delta Drone 32
 DHL 127
 Direction de circulation aéronautique militaire
 142
 Direction générale de l'aviation civile 129
 DJI 79
 données personnelles 142
 droit à l'image 143
 drone convertible 38
 Drone Y 35

E

émetteur
 boîtier 56
 pupitre 56
 vidéo 48
 épandage aérien 112
 ESC 31
 extradados 69

F

Fédération française d'aéromodélisme 162

filtre polarisant 106
firmware 152
 focale 103
Follow Me 92
format
 .jpeg 106
 .raw 106
forme en H 36
frein filet 149

G

gain 165
GIE Intra 109
Global Mapper 118
GoPro 103
gouvernail 73
gouverne aérodynamique 72
GPS 12
gyroscope 43

H

hauteur 132
hélice 52
hélicoptère traditionnel 28
Henschel HS 293 8
hexacoptère 34
Horizon Hobby Blade 350 QX 153
Hubsan X4 H107D 153

I

image 2D 114
iMovie 108
incidence 67
Infotron IT180 30
inspection d'ouvrages 125
intrados 69

K

Kennedy (Joe) 5
Kettering Bug 4

L

lacet 72
Lady Bird 153
latence 59
Lehmann Aviation 27
Lidar 125
logiciel
 de navigation cartographique 135
 photogrammétrique 114

lunettes vidéo 59

M

MALE 11
MAVinci Sirius 62
MikroKopter 152
mode
 acrobatique 92
 Position Hold 87
 Retour à la maison 87
 stationnaire 87
modèle
 numérique de surface 116
 numérique en trois dimensions 114
modem 48
module GPS 45
moteur
 à cage fixe 51
 à cage tournante 51
 brushless 51
multirotor 28

N

nacelle 55

O

octocoptère 34
On Screen Display 85
orthophoto 116

P

panorama 91
parachute 63
pas
 cyclique 77
 variable 28
Phantom (DJI) 153
photogrammétrie 115
photo verticale 103
plan de vol 95
portance 67
postproduction 107
précession gyroscopique 77
précision 115
Predator 12
prime d'assurance 141

Q

quadrocoptère 32
Queenbee 4

R

R20 9
rabattante 81
Radio MC32 Graupner 58
Radioplane 5
récepteur 47
reconnaissance de formes 113
règles de l'air 130
régulateur de tension 148
relevé topographique 114
représentation 4D 123
résolution 116
Rmax 22
rotor anticouple 75
roulis 72
RQ-4 Global Hawk 12
RQ-11 Raven 13

S

scénario de vol 132
Schiebel X100 30
SDTI 9
sécurité du public 108
senseFly eBee 41
serre-câbles 149
SNCF 109
Sperry (Elmer Ambrose) 3
surveillance 109
SURVEY Copter 29
Système information géographique 118

T

tangage 72
taux de recouvrement 125
télécommande 56
Tesla (Nikola) 3
théorème de Thalès 114
tracking 110
traction 68
translation 71
Trimble UX5 63
Trimble X100 28

tube de Pitot 44

U

UAS 25
UAV 25

V

V1 6
V2 6
vent relatif 67
venturi 81
vidéo 107
vie privée 142
voies 57
voilures
fixes 26
tournantes 26
voir et éviter 130
vol
à vue 83
en immersion 84
préprogrammé 88
stationnaire 75
von Braun (Wernher) 8
vue
à 70-80° 105
oblique 104

W

Way Point 88
Weller 152
wingtips 28

Z

zones
dangereuses 138
réglementées 138

CHEZ LE MÊME ÉDITEUR

Dans la collection « Serial Makers »

F. BOTTON. – **Les drones de loisir (2^e édition).**

N° 14436, 2016, 230 pages.

E. BARTMANN. – **Le grand livre d'Arduino (2^e édition).**

N° 14117, 2015, 586 pages.

C. PLATT. – **L'électronique en pratique 2. 36 expériences ludiques.**

N° 14179, 2015, 336 pages.

C. PLATT. – **L'électronique en pratique. 36 expériences ludiques.**

N° 13507, 2013, 344 pages.

J. BOYER. – **Réparez vous-même vos appareils électroniques.**

N° 13936, 2014, 384 pages.

M. RICHARDSON et S. WALLACE. – **À la découverte du Raspberry Pi.**

N° 13747, 2013, 176 pages.

A. BANKS, MACUSER et iFIXIT. – **Réparez vous-même votre Apple.**

Une seconde vie pour votre iPhone, MacBook, iMac...

N° 14251, 2015, 146 pages.

B. PETTIS, A. KAZIUNAS FRANCE et J. SHERGILL. – **Imprimer en 3D avec la MakerBot.**

N° 13748, 2013, 226 pages.

M. BERCHON. – **L'impression 3D (2^e édition).**

N°13946, 2014, 232 pages.

C. BOSQUÉ, O. NOOR et L. RICARD. – **FabLabs, etc. Les nouveaux lieux de fabrication numérique.**

N° 13938, 2015, 216 pages.