

# Construire son DRONE

## Graphisme de couverture et maquette intérieure :

Maud Warg

## Mise en page :

PCA

## Photographies de couverture :

Alex Elliott, sauf 1<sup>re</sup> de couverture, en bas à gauche : Sam Evans

## Traduction :

Dominique Maniez

<p>Le pictogramme qui figure ci-contre mérite une explication. Son objet est d'alerter le lecteur sur la menace que représente pour l'avenir de l'écrit, particulièrement dans le domaine de l'édition technique et universitaire, le développement massif du photocopillage.</p> <p>Le Code de la propriété intellectuelle du 1<sup>er</sup> juillet 1992 interdit en effet expressément la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droit. Or, cette pratique s'est généralisée dans les établissements</p>	<p>d'enseignement supérieur, provoquant une baisse brutale des achats de livres et de revues, au point que la possibilité même pour les auteurs de créer des œuvres nouvelles et de les faire éditer correctement est aujourd'hui menacée. Nous rappelons donc que toute reproduction, partielle ou totale, de la présente publication est interdite sans autorisation de l'auteur, de son éditeur ou du Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC, 20, rue des Grands-Augustins, 75006 Paris).</p>
--	---



© Dunod, 2017

11 rue Paul Bert, 92240 Malakoff

[www.dunod.com](http://www.dunod.com)

ISBN 978-2-10-075848-7

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, 2° et 3° a), d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (art. L. 122-4).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.

Alex Elliott

# Construire son DRONE

**LE GUIDE ILLUSTRÉ PAS À PAS**

Traduit de l'anglais par Dominique Maniez

DUNOD



## 1 UNE BRÈVE HISTOIRE DES DRONES

- 8 La naissance des avions sans pilote
- 14 L'ascension des drones de loisir

## 2 LES TYPES DE DRONES

- 18 En kit ou prêt à voler ?
- 19 Aéronefs à voilure fixe
- 22 Giravions



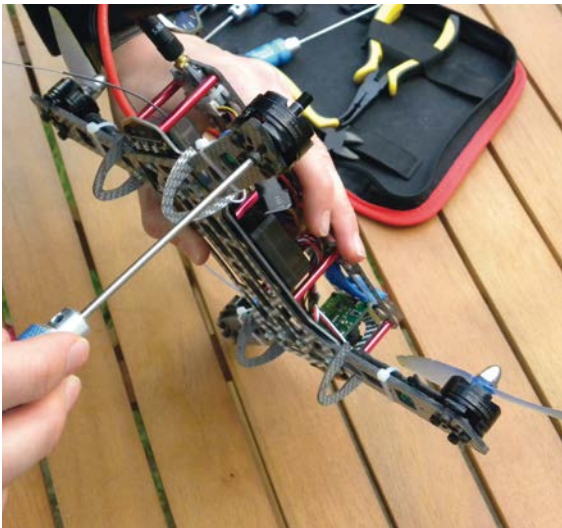
## 3 LES DIFFÉRENTES APPLICATIONS

- 36 Cartographie et inspection
- 40 Photographie aérienne
- 42 Surveillance
- 43 Livraison par drone
- 44 Amateurs



## 4 L'ANATOMIE D'UN DRONE

- 50 La cellule ou le châssis
- 60 Le pilote automatique
- 75 La radiocommande
- 86 Les moteurs
- 89 Les régulateurs de vitesse électroniques
- 101 Les hélices
- 110 Les batteries
- 117 Les nacelles et les caméras
- 127 Le FPV
- 143 Choix des composants de votre drone



## 5 TROIS RÉALISATIONS PAS À PAS

- 154 Drone pour la photographie aérienne
- 178 Mini quadricoptère FPV
- 190 Drone à voilure fixe



## 6 VOLER EN TOUTE SÉCURITÉ

- 212 Consignes de sécurité
- 215 Apprendre à voler
- 218 Contrôles avant le vol
- 225 Où obtenir de l'aide



## 226 TABLEAUX DES PERFORMANCES DES MOTEURS

## 230 LEXIQUE ANGLAIS/FRANÇAIS

## 232 RESSOURCES

## 233 INDEX

## 239 CRÉDITS PHOTOGRAPHIQUES





**1**

# **UNE BRÈVE HISTOIRE DES DRONES**

Le terme « drone » a souvent mauvaise presse. Dans les médias, on l'associe aux frappes aériennes et à la guerre. Les drones sont cependant bien plus que des armes. Ils sont utilisés par des milliers d'amateurs et de très nombreuses organisations dans le monde, pour les loisirs, la recherche, la préservation des espèces, l'agriculture et même pour sauver des vies. Il faut donc redorer le blason de ce terme afin que les gens commencent à comprendre tout son potentiel.

D'un point de vue technique, beaucoup de gens définissent les drones comme des machines ayant la capacité de voler de manière entièrement autonome, du décollage jusqu'à l'atterrissage. Dans ces conditions, certains quadricoptères commercialisés aujourd'hui ne sont pas, techniquement parlant, des drones, mais plutôt des quadricoptères télécommandés. Bien qu'ils aient une certaine autonomie, ils ne peuvent pas complètement voler de façon indépendante, en décollant automatiquement, en parcourant une série de points de passage et en atterrissant ensuite sans assistance. De la même manière, beaucoup de soi-disant drones utilisés par les militaires sont en fait des appareils qui sont toujours pilotés à distance par un être humain.

Dans ce livre, j'utilise le terme « drone » assez librement pour désigner tous les aéronefs radiocommandés qui ont un contrôleur de vol.

## LA NAISSANCE DES AVIONS SANS PILOTE

Afin d'apprécier pleinement l'histoire des drones, nous devons étudier l'histoire générale des avions sans pilote, qui a connu des développements parallèles à celle de l'aviation habitée dès le début des vols habités. L'histoire des drones a une face sombre, car ils ont souvent été utilisés comme des armes puissantes et ils le sont encore aujourd'hui. Cependant, les dernières applications civiles permettent de plus en plus souvent aux drones d'avoir des rôles positifs et d'être utilisés dans des sauvetages.

Selon la façon dont vous définissez le mot « drone », vous pouvez soutenir que les engins volants sans pilote ont été employés dès 1849, quand des ballons équipés de bombes ont été utilisés par l'armée autrichienne lors d'une attaque sur Venise. Cependant, on admet plus communément que le premier vol d'un aéronef sans pilote remonte aux années 1890, quand Otto Lilienthal, un pionnier de l'aviation allemande, a expérimenté des planeurs sans pilote pour tester la conception d'ailes volantes légères. Comme pour de nombreuses conceptions pionnières d'avion expérimental, il n'y avait personne à bord afin de ne pas blesser les courageux pilotes d'essai. Cela a eu pour conséquence que Lilienthal a pu tester bon





À GAUCHE L'Aerodrome numéro 6 de Samuel P. Langley a réalisé le premier vol longue distance d'un avion à moteur sans pilote. Il a été lancé par une catapulte montée sur une péniche naviguant sur le Potomac (dans l'État de Virginie aux États-Unis) en novembre 1896 et a parcouru près de 1 500 mètres. Il était alimenté par un moteur à vapeur monocylindre entraînant deux hélices via une transmission à engrenages.

nombre de ses conceptions audacieuses en toute sécurité et tirer des enseignements des accidents.

À la même époque, en 1896, Samuel Pierpont Langley expérimentait un avion à vapeur. Il est intéressant de noter que son avion était lancé en employant un système de catapulte, méthode encore utilisée par certains drones modernes. L'avion de Langley sans pilote, qui n'était pas téléguidé et s'appelait « Aerodrome », réussissait juste à voler pendant un kilomètre le long du Potomac, dans le cadre d'un processus de test pour un avion habité. Bien que le projet ait été finalement abandonné, ce vol d'essai a représenté quelque chose dans le monde de l'aviation car c'était le premier vol réussi d'un avion autopropulsé sur une distance relativement importante. Cette expérience a eu lieu plusieurs années avant le célèbre vol des frères Wright.

Malgré les vols réussis d'aéronefs sans pilote, on s'est rapidement aperçu que disposer d'un pilote afin de contrôler l'avion était plus pratique pour faire progresser la conception et le développement des avions. Avoir des pilotes à bord était donc un risque qu'il fallait prendre. Le vol historique des frères Wright a enseigné au monde que l'on pouvait contrôler le vol en utilisant le gauchissement des ailes pour gérer le roulis de l'aéronef, et cette découverte a conduit à une avancée des progrès

À DROITE Modèle à l'échelle du Kettering Bug, exposé au Musée national de l'armée de l'air américaine, à Dayton dans l'Ohio. Le train d'atterrissage principal se détachait de l'avion pendant le décollage.



techniques de l'industrie aéronautique. Le succès des frères Wright a été le catalyseur qui a façonné la science de l'aviation telle qu'elle est aujourd'hui.

Peu longtemps après, Lawrence Sperry (connu comme « le grand-père des pilotes automatiques ») a utilisé les gyroscopes inventés par son entreprise familiale pour construire les premiers pilotes automatiques afin d'aider les pilotes à contrôler leurs avions. En 1914, le pilote automatique de Sperry permettait à un avion habité de voler tout droit et à la même altitude, ce qui réduisait considérablement la charge de travail du pilote.

C'est également à cette époque que le professeur Archibald Low a joué un rôle important dans l'élaboration des systèmes de radioguidage pour contrôler à distance les avions ; cette découverte a abouti en 1917 au vol télécommandé du *Ruston Proctor Aerial Target*, avion sans pilote qui attaquait les dirigeables Zeppelin. Il convient également de noter que des années plus tôt, en 1898, l'inventeur Nikola Tesla avait déjà fait la démonstration que l'on pouvait contrôler à distance un bateau.

Pendant la Première Guerre mondiale, le programme Kettering Bug a été le premier grand projet à employer des avions sans pilote. Ce biplan, qui était essentiellement une torpille volante, avait un système de guidage conçu par Elmer Sperry, le père de Lawrence ; le système était propulsé par un moteur à piston qui utilisait un mécanisme de chariot et de rails pour décoller. En théorie, le Kettering Bug pou-

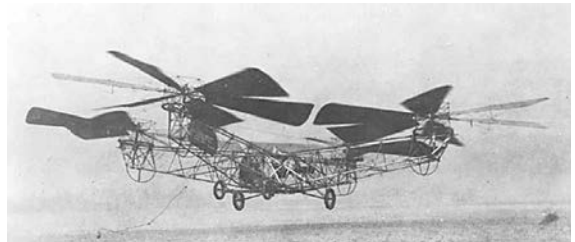
vait naviguer de manière autonome pendant 64 kilomètres jusqu'à sa cible, guidé par un pilote automatique basé sur un gyroscope avec un baromètre anéroïde pour surveiller l'altitude. Afin de mesurer la distance parcourue, l'avion utilisait un système mécanique basé sur le nombre de tours du moteur nécessaire pour que l'avion atteigne sa cible. Toutefois, le Kettering Bug ne fut jamais déployé parce que la Première Guerre mondiale a pris fin avant qu'il ne soit terminé.

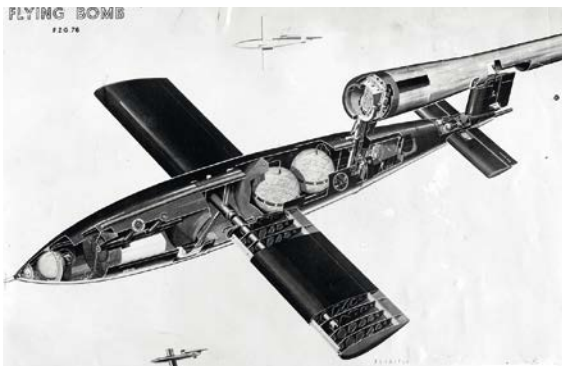
C'est en 1922 que le premier avion ressemblant à un quadricoptère a volé avec succès. Connu sous le nom d'hélicoptère De Bothezat, il utilisait des rotors dans une structure en forme de X. Une centaine de vols ont été réalisés, la plus haute altitude ne dépassant pas les 5 mètres. Cependant, la conception fut abandonnée en raison de sa complexité mécanique et de la charge de travail exceptionnellement élevée pour le pilote durant un vol stationnaire.

Entre les deux guerres mondiales, le développement de l'autonomie des avions sans pilote a été limité, mais les progrès dans les transmissions par radiofréquence ont facilité le pilotage des avions à distance, rendant ainsi les pilotes automatiques inutiles. Diverses améliorations mineures sont également apparues dans le domaine des pilotes automatiques et des actionneurs. Ces systèmes, dont beaucoup ont été produits par des entreprises britanniques, étaient principalement utilisés dans l'artillerie pour atteindre des cibles aériennes. Au cours de cette période, la production de 12 000 aéronefs sans pilote a servi à la formation des pilotes qui pouvaient s'entraîner sur des cibles radio-pilotées. Aujourd'hui encore, cela reste une application militaire majeure pour les drones, bien qu'ils aient à l'heure actuelle une bien plus grande autonomie.

Pendant la Seconde Guerre mondiale, on a assisté à une très forte progression des aéronefs sans pilote, notamment en Allemagne. Parmi les nombreux missiles de croisière développés par l'Allemagne au cours de cette période, le plus connu était le V1 Fieseler, communément appelé « bombe bourdonnante » (*buzz bomb*) en raison de la sonorité caractéristique produite par son pulsoréacteur. La Luftwaffe a également utilisé des bombes larguées depuis des planeurs radiocommandés pour attaquer les navires de guerre, les plus courantes étant le modèle Fritz X. La Luftwaffe a notamment employé ce type de bombe lors du naufrage du *Roma*, navire de guerre italien coulé alors qu'il allait se rendre aux alliés. Fait intéressant, l'épave du *Roma* a été découverte il y a seulement quelques années, en 2012, par un autre drone, bien qu'il s'agisse cette fois-ci d'un robot sous-marin.

**CI-DESSOUS Hélicoptère conçu par George De Bothezat, à McCook Field (Ohio), en train de redescendre après être resté en l'air pendant 2 minutes et 45 secondes.**





CI-DESSUS Coupe d'un V1 montrant ses principaux composants.

Les alliés ont aussi utilisé des avions sans pilote pendant la Seconde Guerre mondiale, notamment le drone d'assaut TDR-1 employé par l'US Navy. Version modifiée de l'Interstate bimoteur, ce fut probablement le premier missile piloté par la vidéo, car il était contrôlé à distance par un opérateur volant dans un avion de chasse qui pouvait voir ce que le TDR-1 voyait par le biais d'une caméra embarquée qui lui renvoyait un signal vidéo.

Le projet Aphrodite, autre programme de développement américain, avait pour but de convertir des bombardiers, comme le célèbre B-17, en avion sans pilote. Une nouvelle fois, le concept de pilotage vidéo était utilisé car l'avion était guidé à distance par radiocommande, le pilote étant capable de voir ce que l'avion voyait et de lire les instruments du poste de pilotage via un flux vidéo émis par des caméras embarquées. L'avion devait décoller manuellement avec un équipage à bord, mais une fois en vol, l'équipage armait les bombes, passait la main au pilote distant et sautait en parachute alors qu'il n'était pas encore en zone ennemie. L'avion continuait ensuite vers sa cible sous le contrôle d'un pilote distant. Généralement, ces missions étaient menées en territoire ennemi pour des objectifs souterrains, tels que les usines de bombes V1. Toutefois, le projet n'a pas eu beaucoup de succès car il était complexe et coûteux, mais aussi parce que les bombes pénétrantes mises au point par les Britanniques étaient inefficaces pour de telles missions. Plus tard, ces aéronefs sans pilote contrôlés à distance ont été utilisés pendant des essais de bombes nucléaires, pour voler à travers le champignon atomique et étudier les effets des radiations grâce à des capteurs embarqués.

Après la Seconde Guerre mondiale, les drones ont été principalement utilisés comme cibles d'entraînement pendant la formation des pilotes. Il y a eu quelques cas de conversion d'avions pilotés en bombes volantes au cours de la guerre de Corée, mais il n'y a eu aucun progrès révolutionnaire durant cette période, principalement en raison de la mise au point de missiles de croisière, en grande partie basés sur le V1 Fieseler allemand. Ces recherches ont débouché sur les missiles de croisière que nous connaissons aujourd'hui, et qui sont capables de voler de manière autonome vers leur cible.

L'entreprise aéronautique Ryan en Californie a été le leader, dans les années 1960, de la conception des drones cibles, dont le plus célèbre de cette période a été le Teledyne Ryan Firefly (modèle de la famille Firebee), qui a été parmi les drones cibles l'engin le plus largement produit à ce jour. En raison de son succès

dans les drones cibles, on a également demandé à cette entreprise de développer une variante pour la surveillance, qui a effectué son premier vol en 1964. Certaines versions du Firefly ont servi au Vietnam pour des missions de surveillance et de reconnaissance, comme l'évaluation des dommages à l'issue de combats. Avec au bout du compte une production de plus de 7 000 exemplaires, toutes variantes confondues, les drones Firefly/Firebee sont sans nul doute les précurseurs de tous les drones modernes. Beaucoup servent encore dans les forces armées du monde entier et certains ont été utilisés récemment, en 2003, lors de l'invasion de l'Irak, où ils précédaient des avions pilotés afin d'établir des rideaux de leurres antimissiles.

Les années passant et la technologie s'améliorant, les drones sont devenus une solution fiable pour des opérations de reconnaissance, ce qui a notamment conduit à la généralisation du tristement célèbre drone Predator. En raison de sa capacité à voler pendant de longues périodes à haute altitude, ce drone a commencé sa carrière comme plateforme de reconnaissance, mais des versions armées sont apparues en 2001 et sont encore en usage aujourd'hui.

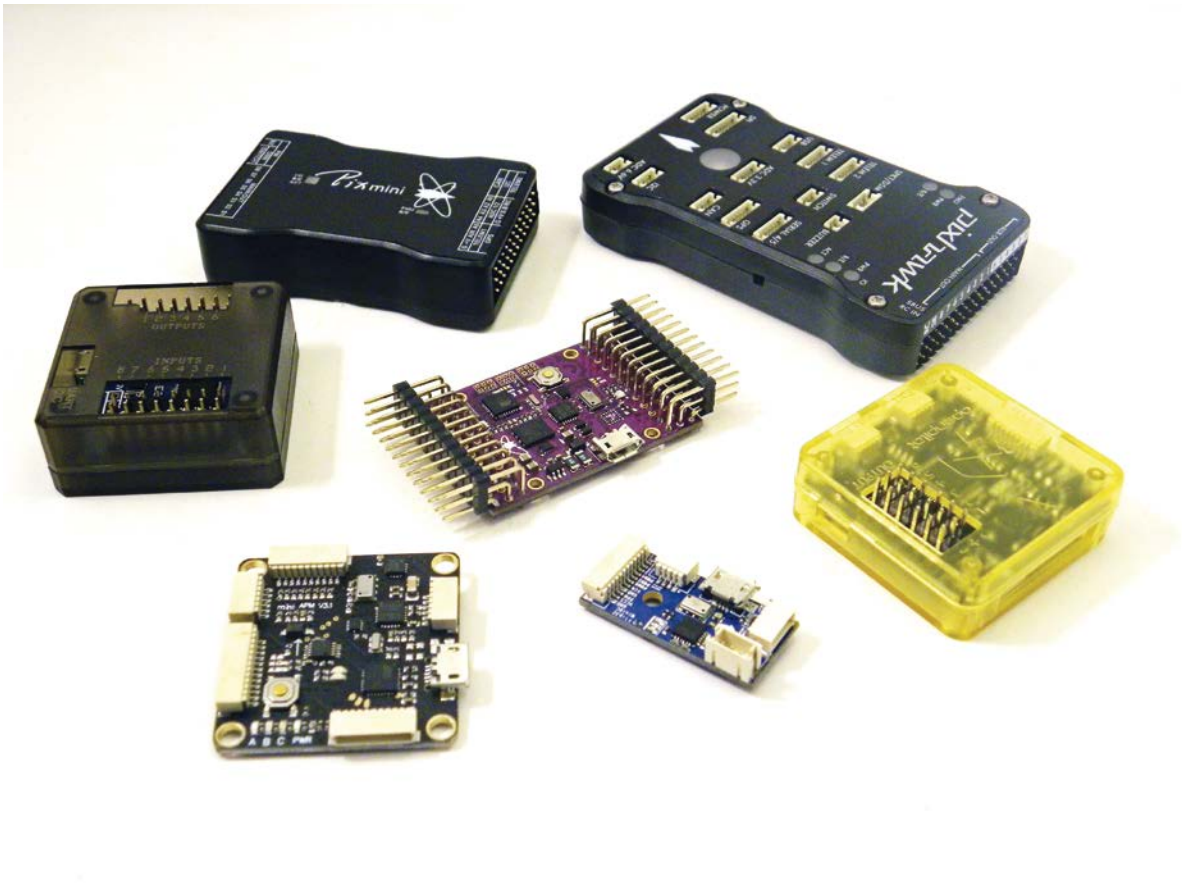


À DROITE Avion Lockheed DC-130 transportant sous ses ailes deux drones cibles BQM-345 Firebee.

## L'ASCENSION DES DRONES DE LOISIR

Comme avec la plupart des technologies militaires, cela n'a été qu'une question de temps pour que les drones commencent à être adoptés pour un usage civil. Les débuts des petits drones de loisir peu coûteux sont liés au projet Paparazzi qui a débuté en 2003. L'objectif du projet Paparazzi était d'élaborer un système de pilote automatique open source ; au fil des ans, ce projet a connu de nombreuses versions et il est aujourd'hui toujours actif et en développement. Sa nature open source a beaucoup facilité la pratique du drone de loisir car les développeurs publient tous les codes source et les fichiers de conception du pilote automatique. Ceux-ci servent à la communauté des amateurs de drones qui ajoute de nouvelles fonctionnalités, corrige les bugs et améliore les conceptions matérielles. Malgré les efforts déployés par les premiers développeurs du projet Paparazzi, les résultats étaient limités à cause du manque de capteurs puissants et bon marché ; l'autre raison était que

CI-DESSOUS Une large gamme de cartes de pilote automatique est à votre disposition.



leur objectif principal était simplement d'arriver à faire voler leur machine, et qu'ils avaient consacré peu d'effort pour rendre le système facile à utiliser. Cette complexité a limité à son tour l'adoption des drones de loisir aux universités et à leurs étudiants ainsi qu'aux autres passionnés qui avaient déjà de bonnes connaissances en électronique.

C'est seulement à partir de 2009 que le prix des capteurs et des processeurs a commencé à chuter, grâce à l'avènement de la technologie des smartphones. En raison de la production en série des smartphones, la technologie a rapidement commencé à s'améliorer et à devenir encore moins coûteuse, si bien qu'un capteur inertiel qui autrefois aurait valu des centaines d'euros n'en coûte aujourd'hui qu'une poignée, en raison des économies d'échelle. Cela signifie que les développeurs peuvent intégrer désormais dans leurs projets de pilote automatique de meilleurs capteurs pour un coût très inférieur. En fait, la plupart des pilotes automatiques de loisir actuels partagent les mêmes capteurs que l'on trouve dans un smartphone de milieu de gamme. Il y a même plusieurs projets qui transforment un véritable smartphone en pilote automatique !

C'est également autour de l'année 2009 qu'a été lancé le projet de pilote automatique open source ArduPilot, qui avait pour but de démocratiser les drones. Basé à l'origine sur la plateforme électronique Arduino, le premier pilote utilisait des thermopiles pour maintenir la stabilité de l'avion. Les thermopiles mesurent la quantité d'énergie thermique, et si l'on en utilise plusieurs (vers le haut, vers l'avant, vers le bas, à gauche et à droite) l'angle de l'avion peut être estimé en fonction de la différence de température entre le ciel et le sol. Des versions plus récentes du projet ArduPilot ont par la suite commencé à utiliser des capteurs inertiels comme des accéléromètres et des gyroscopes, car ils offrent une précision bien supérieure.

Chaque année, le projet ArduPilot gagne du terrain, ajoute de nouvelles fonctionnalités et rend les choses encore plus faciles à utiliser. Aujourd'hui, le logiciel ArduPilot est capable de contrôler tous les véhicules sans pilote, qu'il s'agisse d'avions, de multicopters, de bateaux ou de véhicules terrestres. Il existe plusieurs autres projets de pilote automatique, certains se concentrant sur des plateformes spécifiques, mais le projet ArduPilot est probablement la plateforme de drone la plus populaire, car il permet de transformer un avion radiocommandé en un drone capable de voler de manière autonome, du décollage jusqu'à l'atterrissage.

**2**

# **LES TYPES DE DRONES**







**PAGE PRÉCÉDENTE** Exemple de configuration classique avec un système vidéo FPV permettant au pilote de recevoir des images en temps réel de l'avion en vol. Le moteur de l'avion est monté à l'arrière de telle sorte que l'hélice n'est pas dans le champ de la caméra.

Les drones sont habituellement classés par taille ou configuration. La configuration peut être décomposée en deux types principaux : les aéronefs à voilure fixe, où à l'instar des avions traditionnels, la portance est créée par les ailes lors du déplacement de l'avion, et les aéronefs à voilure tournante (appelés aussi giravions) dans lesquels les ailes (rotors) tournent pour permettre de s'élever, comme sur un hélicoptère. Les drones sont également classés en fonction de leur taille et de leur poids. Dans ce livre, nous allons nous concentrer sur les petits et les micro-drones qui ne dépassent pas 7 kilos, car c'est actuellement le poids maximal au-dessous duquel la réglementation n'est pas trop contraignante. Il est très rare qu'un drone de loisir fasse plus de 7 kilos, car les drones qui sont plus lourds, impliquent souvent des équipements spécialisés destinés à un usage commercial.

## EN KIT OU PRÊT À VOLER ?

On rencontre de nombreux avions en kit (qu'il s'agisse de multicopters ou d'avions à voilure fixe) que des pilotes ont conçus et construits eux-mêmes. Cependant, bien que la construction d'un aéronef à partir de zéro puisse être une expérience très enrichissante une fois que vous l'avez menée à bien, elle peut aussi être coûteuse et frustrante si vous n'avez pas les compétences nécessaires. Je vous suggère donc de démarrer avec une structure standard de drone prêt à l'emploi pour que vous puissiez vous concentrer sur tous les autres aspects de la construction, comme la configuration du pilote automatique et le paramétrage de l'équipement FPV, etc. En rajoutant la création d'un châssis personnalisé qui peut ne pas voler correctement, vous créez une complication supplémentaire qui est inutile. Néanmoins, la construction de votre propre drone est une expérience qu'il vous faudra tenter plus tard, quand vous serez familiarisé avec les avions radiocommandés et les drones en général.

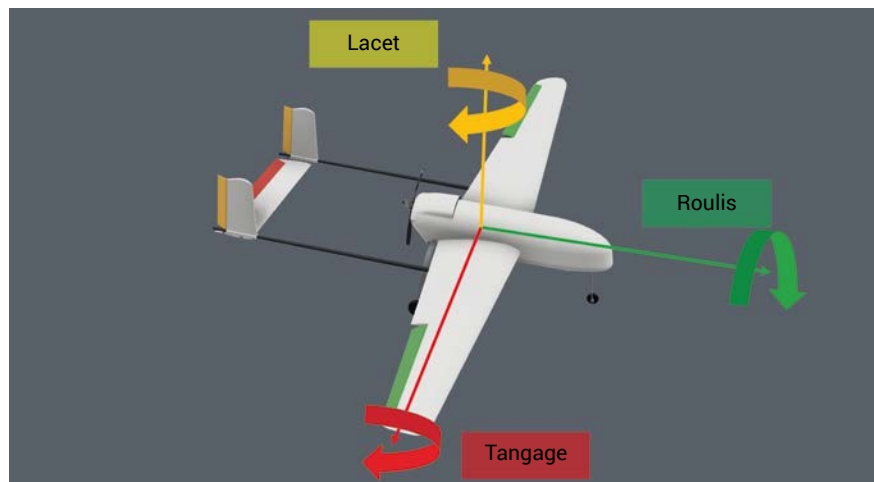
Si vous souhaitez vous engager dans la conception d'un drone à voilure fixe en kit, il est préférable de passer d'abord un peu de temps à apprendre les bases de l'aérodynamique, afin de s'assurer que vous allez concevoir quelque chose qui volera. Sinon, il y a d'innombrables plans que l'on trouve en ligne, et que vous pouvez suivre ou utiliser comme base de votre propre conception. Des kits de drones complets sont également disponibles et vous n'avez plus qu'à les assembler, ce qui est un excellent moyen d'apprendre les bases de la construction de drones. Il y a un autre avantage à construire son propre drone (hormis les économies réalisées) : vous allez comprendre comment il fonctionne, ce qui facilitera les choses lorsqu'il s'agira de le réparer ou de le mettre à niveau.

Toutefois, si vous voulez simplement pratiquer le pilotage, vous pouvez toujours acheter un drone prêt à voler, livré tout monté et paramétré ; vous n'aurez alors besoin que de charger les batteries pour être prêt à décoller. Les drones prêts à voler sont certainement une excellente façon de découvrir ce loisir, mais une fois que vous avez appris à voler, l'étape suivante consiste à essayer de construire son propre drone.

En ce qui concerne les aéronefs en kit, les châssis de multicoptères sont plus faciles à concevoir et à construire que les aéronefs à voilure fixe, car vous n'avez pas besoin de vous soucier de l'aérodynamique et des autres facteurs de stabilité. Les châssis de multicoptères ne sont qu'un ensemble de bras qui soutiennent les moteurs, avec une section centrale qui contient l'équipement. Dans cet ouvrage, nous allons nous concentrer sur la construction de drones personnalisés basés sur la combinaison de différents composants et leur intégration à une plateforme d'avion radiocommandé standard prête à l'emploi.

## AÉRONEFS À VOILURE FIXE

Sans trop rentrer dans les détails techniques, les avions utilisent une source de propulsion (un moteur électrique et une hélice dans notre cas) pour générer la portance sur l'aile afin de permettre à l'avion de voler. Il existe de nombreuses configurations pour les aéronefs à voilure fixe qui dépendent d'une combinaison de facteurs, notamment le placement de l'aile, le nombre d'ailes, le style du corps principal, les gouvernes et l'empennage. Plutôt que de détailler toutes les configurations possibles dans cette section, nous allons couvrir seulement les principales confi-



À GAUCHE Les trois axes de déplacement d'un avion.

gurations qui sont les plus adaptées aux drones de loisir et au vol FPV. On pourrait consacrer un livre entier à la construction des aéronefs à voilure fixe et il en existe d'ailleurs plusieurs sur le sujet, ainsi que de nombreuses informations en ligne.

Lorsqu'un avion vole, son angle peut changer selon trois axes : l'axe du tangage (l'avion s'incline vers le haut et vers le bas), l'axe du lacet (l'avion change de direction) et l'axe du roulis (l'avion roule sur le côté gauche et droit).

Afin de contrôler un aéronef à voilure fixe, les ailes et l'empennage ont quelques petites zones ressemblant à un aileron que l'on appelle gouvernes. Il y a trois gouvernes principales : les ailerons (ou gouvernes latérales) qui contrôlent le roulis de l'avion, la gouverne de direction qui contrôle le mouvement du lacet et les gouvernes de profondeur qui contrôlent le tangage.

## POUSSEUR OU TRACTEUR ?

Quelle que soit la disposition de l'aile d'un drone à voilure fixe, l'emplacement du moteur est une caractéristique qui permet de définir une autre classification. La plupart du temps, les moteurs sont situés à l'arrière de l'avion et sont donc classés dans la catégorie des avions « pousseurs » (*pusher* en anglais) où le moteur pousse l'avion vers l'avant. Cette configuration est très populaire quand on utilise un drone parce que l'hélice ne rentre pas dans le champ de la caméra embarquée quand on regarde vers l'avant.

Les configurations de type « tracteur » (*puller* en anglais) ont leur moteur monté avec l'hélice à l'avant, et l'avion est tiré vers l'avant. Il s'agit d'une configuration plus classique qui peut être légèrement plus efficace qu'un pousseur, car le flux d'air qui

À DROITE Les trois gouvernes principales d'un aéronef à voilure fixe.

