



Les drones au service de la construction

Technologies, enjeux et perspectives

Août 2019



cstc.be
Recherche • Développe • Informe

Les drones au service de la construction

Technologies, enjeux et perspectives

Auteurs

Samuel Dubois, Yves Vanhellemont, Michael de Bouw (CSTC)

Août 2019

CENTRE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE DE LA CONSTRUCTION

CSTC, établissement reconnu en application de l'arrêté-loi du 30 janvier 1947
Siège social : Rue du Lombard 42 à 1000 Bruxelles

Publication à caractère scientifique visant à faire connaître les résultats des études et recherches menées dans le domaine de la construction en Belgique et à l'étranger.

La reproduction ou la traduction, même partielles, du texte de la présente monographie n'est autorisée qu'avec le consentement de l'éditeur responsable.



Sommaire

PRÉFACE	5
ABRÉVIATIONS ET LEXIQUE	7
1. CONTEXTE	9
1.1 Des premiers pas à l'explosion du marché	9
1.2 Ni un gadget ni un ovni	10
2. VUE GÉNÉRALE DE LA TECHNOLOGIE	11
2.1 Terminologie	11
2.2 Types de drones	12
2.2.1 Drones à voilure fixe	12
2.2.2 Drones à voilure tournante	12
2.2.3 Autres systèmes	14
2.3 Le choix d'un drone	14
3. ANATOMIE D'UN MULTICOPTÈRE ÉLECTRIQUE ET DE SES ÉQUIPEMENTS	17
3.1 Composants standard	17
3.1.1 Système de propulsion	17
3.1.2 Châssis	18
3.1.3 Système de communication	18
3.1.4 Source et gestion de l'énergie	18
3.1.5 'Système nerveux' central	19
3.2 Charge utile et outils embarqués	19
3.2.1 Photographie et vidéographie par drone	19
3.2.2 Dispositifs de vision avancés	24
3.2.3 Traitement des images capturées	26
3.2.4 Autres équipements et capteurs spécifiques	27
3.3 Equipements au sol	28
3.3.1 Télécommande	28
3.3.2 Retour vidéo	29
3.4 Télépilotage et automatisation du vol	30

4. DES MODÈLES 3D CRÉÉS PAR DRONE	33
4.1 Introduction.....	33
4.2 Technologies de numérisation 3D utilisables avec un drone	34
4.2.1 Reconstruction 3D par corrélation d'images.....	34
4.2.2 Localisation et cartographie simultanées sans GPS.....	39
4.3 Echelle des objets étudiés et utilisations des modèles 3D	39
5. ANALYSE DES OPPORTUNITÉS POUR LE SECTEUR DE LA CONSTRUCTION	43
5.1 Introduction.....	43
5.2 Utilisations éprouvées du drone	44
5.2.1 Documentation et communication.....	44
5.2.2 Inspection	45
5.2.3 Mesures de précision : conception, exécution et contrôle	47
5.2.4 Surveillance et monitoring	50
5.3 Utilisations avancées	50
5.3.1 Logistique sur chantier	50
5.3.2 Transport d'objets et de matériaux	51
5.3.3 Interventions sur les bâtiments.....	52
5.3.4 Cartographie en intérieur.....	52
6. SITUATION EN BELGIQUE	53
6.1 Principaux organismes liés aux drones en Belgique	53
6.2 Encadrement réglementaire.....	53
6.2.1 Pourquoi réglementer l'usage des drones ?	53
6.2.2 L'arrêté royal en Belgique	54
7. ANALYSE DES OBSTACLES.....	57
7.1 Freins globaux à l'utilisation des drones	57
7.2 Obstacles spécifiques lors de la réalisation d'une mission	57
8. EVOLUTIONS FUTURES.....	61
LIENS UTILES	62
BIBLIOGRAPHIE.....	63

PRÉFACE

L'objectif de cette publication est de permettre à chacun de disposer d'un bon niveau de compréhension des possibilités, mais aussi des limites inhérentes à l'utilisation des drones dans le secteur de la construction. Elle vise également à donner un aperçu des évolutions potentielles de ces technologies et de leur intégration dans les procédures des professionnels de la construction.

Des drones (aéronefs sans pilote ni passager à bord) performants et abordables sont apparus sur le marché ces dernières années. Associés à des équipements variés (appareils photo, caméras thermiques, GPS, ...), ils peuvent déjà remplir de nombreuses tâches sur chantier et faciliter le travail du professionnel du bâtiment (inspection des zones difficilement accessibles, réalisation de modèles 3D de terrain, par exemple). La technologie est en pleine expansion et offre une multitude de possibilités. Ce document a pour but de recenser les technologies disponibles actuellement ainsi que les opportunités qui en découlent pour les professionnels de la construction. Les obstacles au déploiement et à l'utilisation des drones dans le secteur seront également analysés, et des pistes de solution seront avancées.

ABRÉVIATIONS ET LEXIQUE

2D	Deux dimensions
3D	Trois dimensions
ATM	<i>Air Traffic Management</i> (gestion du trafic aérien) Systèmes qui aident les aéronefs à décoller d'un aéroport ou d'un espace aérien de transit et à atterrir à un aéroport de destination.
BES	<i>Building Energy Simulation</i> (simulation énergétique du bâtiment)
BVLOS ou BLOS	<i>Beyond (Visual) Line of Sight</i> (au-delà de la ligne de vue) Mode de pilotage dans lequel le drone sort du champ de vision du télépilote.
CAD	<i>Computer-Aided Design</i> (conception assistée par ordinateur – CAO)
CAM	<i>Computer-Aided Manufacturing</i> (fabrication assistée par ordinateur – FAO)
CCD	<i>Charge-Coupled Device</i> (dispositif à transfert de charge – DTC) Technologie utilisée pour produire des capteurs photographiques.
CMOS	<i>Complementary Metal-Oxide Semiconductor</i> (semi-conducteur complémentaire à l'oxyde de métal) Technologie utilisée pour produire des capteurs photographiques.
DGTA	Direction générale Transport aérien
DOF	<i>Depth of Field</i> (profondeur de champ) Zone dans laquelle doit se trouver un objet photographié pour apparaître comme net sur l'image résultante.
DSM	<i>Digital Surface Model</i> (modèle numérique de surface) Type de livrable issu d'un modèle 3D, qui met en évidence l'élévation d'un terrain et de tous les éléments naturels et construits qui se trouvent à sa surface.
ESC	<i>Electronic Speed Controller</i> (contrôleur de vitesse électronique) Composant électronique qui régule la vitesse de rotation d'un moteur <i>brushless</i> (sans balais).
FC	<i>Flight Controller</i> (contrôleur de vol)
FPS	<i>Frame per Second</i> (images par seconde)
FPV	<i>First Person View</i> (vue à la première personne) Mode de pilotage immersif.
GCP	<i>Ground Control Point</i> (point de contrôle au sol)
GCU	<i>Gimbal Control Unit</i> (contrôleur de prise de vue) Élément électronique qui contrôle les mouvements de la nacelle photographique.
GNSS	<i>Global Navigation Satellite System</i> (système mondial de navigation par satellites) Ensemble de composants permettant d'établir la position géographique d'un objet via un récepteur qui communique avec un réseau de satellites.
GPS	<i>Global Positioning System</i> (système mondial de positionnement)
HVAC	<i>Heating, Ventilation and Air-Conditioning</i> (production de chaleur, ventilation et air conditionné)

IMU	<i>Inertial Measurement Unit</i> (centrale inertielle ou centrale à inertie) Instrument de navigation capable de mesurer les mouvements du drone.
LIDAR	<i>Light Detection and Ranging</i> (détection et estimation de la distance par la lumière) Technologie de mesure de la distance basée sur l'analyse des propriétés d'une lumière laser renvoyée vers son émetteur.
LOS	<i>Line of Sight</i> (ligne de vue)
MCU	<i>Microcontroller Unit</i> (microcontrôleur)
METAR	<i>Meteorological Aerodrome Report</i> (rapport météorologique d'aérodrome) Rapport météorologique complet émis à intervalles de temps réguliers par un aérodrome.
MP	Mégapixel
NADIR	Prise de photographie depuis les airs selon une verticale parfaite par rapport au plan du sol
NOTAM	<i>Notice to Airmen</i> (message aux navigants aériens)
PMU	<i>Power Management Unit</i> (contrôleur d'alimentation) Système qui répartit de manière optimale l'énergie entre les différents composants du drone.
PPK	<i>Post-Processed Kinematic</i> (cinématique posttraitée) Technique de positionnement par satellite améliorée, basée sur l'utilisation différée des données émises par une station de référence.
RGB ou RVB	<i>Red, Green, Blue</i> Rouge, vert, bleu
RPA	<i>Remotely Piloted Aircraft</i> (aéronef télépiloté)
RPAS	<i>Remotely Piloted Aircraft System</i> (système d'aéronef télépiloté)
RTK	<i>Real Time Kinematic</i> (cinématique en temps réel) Technique de positionnement par satellite améliorée, basée sur l'utilisation en temps réel des données émises par une station de référence.
SIG	Système d'information géographique
SFM	<i>Structure from Motion</i> (structure acquise à partir d'un mouvement) Catégorie d'algorithmes d'optimisation qui génèrent des nuages de points à basse définition à partir de multiples photographies ainsi que les paramètres des caméras utilisées pour réaliser ces photographies.
SLAM	<i>Simultaneous Localization and Mapping</i> (localisation et cartographie simultanées) Système permettant à un appareil de reconstruire son environnement et de s'y localiser simultanément.
TLS	<i>Terrestrial Laser Scanner</i> (scanner laser terrestre) Méthode de relevé numérique à haute définition par balayage utilisant la technologie LIDAR. Aussi appelée 'balayage laser' ou 'lasergrammétrie'.
TOF	<i>Time of Flight</i> (temps de vol)
UAS	<i>Unmanned Aircraft System</i> (système d'aéronef sans pilote à bord)
UAV	<i>Unmanned Aerial Vehicle</i> (véhicule aérien sans pilote)
VLOS	<i>Visual Line of Sight</i> (portée visuelle) Mode de pilotage dans lequel le télépilote d'un drone, ou l'observateur en contact permanent avec le télépilote, maintient un contact visuel direct avec l'appareil.

1. CONTEXTE

Il y a quelques années encore, les drones étaient réservés à des applications de pointe, principalement dans le domaine militaire. Beaucoup ont découvert cette technologie en regardant les images des conflits armés du début des années 2000. A la même époque, on trouvait également des avions ou hélicoptères télécommandés dans les clubs d'aéromodélisme, sous forme de modèles réduits dont la construction et le pilotage demandaient de l'enthousiasme et de la persévérance.

Aujourd'hui, des drones 'intelligents' ont conquis le grand public. Les images d'un drone 'livreur de colis' imaginé par un célèbre distributeur en ligne ont, par exemple, fait le tour du monde. Les appareils modernes sont accessibles à tous, en témoignent les petits drones disponibles pour quelques dizaines d'euros sur Internet, qui permettent déjà de réaliser de petits films aériens sans requérir de compétences de pilotage pointues. **Au niveau des secteurs professionnels, la grande diversité des capteurs et des outils que l'on peut embarquer permet d'envisager l'utilisation du drone pour de nombreuses tâches.** L'industrie minière, le secteur énergétique, le secteur agricole et forestier, les médias ou encore la promotion immobilière s'approprient rapidement la technologie.

Le drone moderne est le fruit de nombreuses innovations technologiques mises au point au cours des dernières décennies. Le présent chapitre vise à comprendre ce contexte technologique.

1.1 DES PREMIERS PAS À L'EXPLOSION DU MARCHÉ

Les premiers avions sans pilote ont été construits pendant la Première Guerre mondiale. Il s'agissait originellement 'd'avions-bombes', dont la trajectoire était maintenue par un gyroscope (†) et le moteur préprogrammé pour s'arrêter après une certaine durée de vol (voir figure 1). De tels engins restaient peu fiables et ne furent finalement pas utilisés au combat. En 1937 eut lieu la première démonstration publique d'un vol piloté à distance. Un pas important fut alors franchi : il était désormais possible de modifier la trajectoire de l'appareil en cours de vol.

Au cours des dernières décennies, plusieurs bouleversements technologiques ont ouvert la voie au marché du drone civil que l'on connaît actuellement. L'apparition des systèmes électromécaniques miniatures dans les années 1970 et la tendance générale à la miniaturisation des composants électroniques ont permis le développement de drones de plus en plus petits et légers (voir figure 2). Les systèmes de pilotage automatique se sont étendus aux drones civils à la fin des années 2000. La société MikroKopter a joué un rôle clé dans ce développement, en produisant des contrôleurs de vol (voir § 3.1.5, p. 19) équipés d'un système GNSS (‡), lui-même apparu un peu plus tôt, en 1995 [C2]. Ces composants électroniques constituent



Fig. 1 Le 'Kettering Bug', souvent considéré comme l'ancêtre des drones modernes.



Fig. 2 Le 'Black Hornet Nano', un drone miniature rendu possible grâce aux évolutions de l'électronique.

(†) Un capteur qui indique une variation de direction.

(‡) Le système américain GPS (*Global Positioning System*) est la première technologie GNSS à avoir été déployée dans des appareils pour le grand public. Par extension, le terme GPS est entré dans le langage courant pour désigner la technologie de positionnement par satellite. En réalité, il existe d'autres systèmes tels que le GLONASS russe ou le système Galileo européen.

1. Contexte

le ‘système nerveux central’ des drones modernes, et sont aujourd’hui produits à bas prix. **Des fonctions de vol automatique, auparavant réservées aux modèles très haut de gamme, sont devenues communes sur les modèles actuels.** Il faut également mentionner l’impact des nouvelles technologies de transmission de données, qui ont permis la mise en place de systèmes performants pour le contrôle à très grande distance des drones et de leurs équipements, et qui ont ouvert la voie à la collecte de données en temps réel. **La portée de transmission augmente sans cesse et les risques d’interférence diminuent.** On peut enfin mentionner le développement de nouveaux matériaux tels que la fibre de carbone, qui a très vite été adoptée par les fabricants de drones.

Les technologies numériques connaissent une démocratisation sans précédent, **tant en termes de coûts qu’en termes d’utilisation.** Un passionné disposant de connaissances rudimentaires en programmation et en électronique peut désormais créer un drone sur mesure en assemblant diverses pièces, choisies selon la performance et les fonctionnalités désirées. **Il ne faut d’ailleurs pas négliger le rôle d’Internet dans le succès des drones.** Les plateformes de commerce en ligne, les forums et les tutoriels sont autant de portes d’entrée potentielles vers le monde du drone. Pour les utilisateurs professionnels, les fabricants de drones offrent à présent des solutions robustes et ‘prêtes à voler’.

1.2 NI UN GADGET NI UN OVNI

Le drone séduit peu à peu les professionnels de la construction. A l’ère du virage numérique, il constitue un outil puissant qui offre un point de vue inédit sur les bâtiments et les chantiers (voir figure 3). Il serait dommage de considérer les drones comme de simples gadgets, incapables de générer une plus-value pour le professionnel une fois la tendance passée; c’est loin d’être le cas ! Même si le monde du jouet regorge à présent de petits drones à bas coût aux fonctionnalités limitées, **les appareils conçus pour les professionnels sont extrêmement polyvalents et performants.** Equipés d’une caméra, les drones peuvent être utilisés pour fournir des vues aériennes des projets en cours ou achevés (voir figure 4), et même pour créer des modèles 3D à partir des images obtenues. Ils sont également parfaitement adaptés à des tâches d’inspection ou de monitoring. Leur utilisation facilite la conception et la réalisation des projets, permet de réduire fortement certains coûts, et diminue en outre certains risques pour les travailleurs. A l’avenir, il est certain que les missions qu’on leur confiera seront de plus en plus nombreuses et diversifiées (surveillance de chantier, transport d’outils, etc.).

Afin d’envisager l’usage des drones au quotidien, il est cependant essentiel de bien comprendre la technologie, ses potentialités, mais aussi ses limites. Le drone fait appel à des techniques numériques avancées. Leur utilisation dans le monde professionnel ne s’improvise donc pas, et nécessite une **formation qui dépasse le simple fait d’apprendre à piloter.** En effet, le pilotage de la machine ne doit pas être vu comme une fin en soi; **la réalisation régulière de missions dans des conditions sécurisées et la capture efficace et ciblée de données constituent les réels enjeux de l’emploi d’un drone.** Les fabricants de drones et d’équipements, ainsi que les éditeurs de logiciels, redoublent d’efforts pour atteindre ces objectifs.



Fig. 3 Drone sur chantier.



Fig. 4 Utilisation d’un drone pour le relevé photogrammétrique d’un bâtiment.

2. VUE GÉNÉRALE DE LA TECHNOLOGIE

2.1 TERMINOLOGIE

Dans le langage courant, le drone désigne un aéronef sans pilote ni passager à bord, qui est piloté à distance ou qui vole de manière autonome. La terminologie technique liée aux drones est en réalité plus complexe qu'il n'y paraît. Il existe de nombreux termes et acronymes internationaux les désignant.

Drone

En anglais, le mot 'drone' fut d'abord employé dans le contexte militaire. Dans les années 2000, le terme fut récupéré par la presse francophone et néerlandophone, ce qui explique sa prédominance actuelle dans les articles, ouvrages et événements destinés au grand public. Pour beaucoup, la connotation militaire du mot 'drone' s'estompe petit à petit, grâce aux nombreux reportages qui ont mis en valeur les utilisations diverses de cet outil. L'appellation n'évoque plus uniquement des bombardiers sans pilote, mais aussi des appareils télécommandés capables de réaliser de nombreuses tâches dans le civil. Par simplicité, on utilisera donc le mot 'drone' tout au long de ce document.

UAV et UAS

Les termes '*Unmanned Aerial Vehicle*' (UAV) et '*Unmanned Aerial System*' (UAS) sont plus techniques et très répandus dans le paysage et la littérature officielle anglophones. L'appellation UAV regroupe tous les aéronefs non occupés et plus ou moins intelligents, voire complètement autonomes. On parle aussi parfois simplement de '*Unmanned Aircraft*' (UA). L'acronyme UAS est plus large; il recouvre non seulement le drone, mais également les équipements nécessaires à son commandement à distance. Dans le monde anglophone, ces deux termes sont bien connus des professionnels [C2].

RPAS

Le terme '*Remotely Piloted Aircraft System*' (RPAS), que l'on peut traduire par 'système d'aéronef télépiloté', désigne uniquement les systèmes manœuvrés par un pilote, qualifié de 'télépilote'. Ce dernier peut prendre le contrôle de l'appareil à tout moment du vol [A2], ce qui n'est pas nécessairement le cas lorsque l'on parle d'un UAS. Certains organismes tels que l'Organisation de l'aviation civile internationale ou la Commission européenne [H1] préfèrent cette appellation. Le terme reste relativement peu utilisé en dehors de l'Europe [C2]. Quelle que soit sa forme, un RPAS comprend au moins :

- l'aéronef (ou RPA) proprement dit, qui peut avoir des formes et des tailles très variées. Le tableau 1 donne un exemple de classification des appareils selon leur poids, avec les applications envisageables. Dans la suite du texte, l'accent sera mis sur les applications destinées au secteur de la construction, et donc principalement sur les appareils de moins de 20 kilogrammes
- le poste ou la radiocommande de pilotage
- le système de liaison entre le poste de pilotage et le drone.

Outre les dénominations courantes, il existe une série de classifications et de termes plus marginaux qui se réfèrent à la fonction du drone ('*Unmanned Combat Aerial Vehicle*', par exemple) ou encore à une de ses caractéristiques physiques (NAV pour '*Nano Air Vehicle*', par exemple).

Tableau 1 Catégorisation des drones selon leur gabarit (adapté de [H1]).

Catégorie (poids approximatif)	Applications actuelles et futures
RPAS micro/nano/miniature, poids de quelques centaines de grammes	Utilisation récréative (figures acrobatiques, vol 'FPV') et parfois commerciale (surveillance et inspection d'endroits difficiles d'accès et étroits) Capacité de vol réduite due à la faible autonomie de vol
RPAS de petite taille, poids inférieur à 2 kg	Utilisation récréative et commerciale (photographie et vidéographie)
RPAS de petite taille, poids de 2 à 7 kg	Utilisation commerciale principalement (photographie et vidéographie de pointe, relevé, inspection) Quelques grands modèles récréatifs, pour les passionnés
RPAS de petite taille, poids de 7 à 20 kg	Utilisation commerciale principalement (photographie et vidéographie de pointe, relevé, inspection) Quelques grands modèles récréatifs, très spécifiques
RPAS de grande taille, poids de 20 à 50 kg	Potentiel pour la surveillance et le suivi à large échelle (inspection des pipelines et des lignes à haute tension, épandage agricole, etc.)
RPAS de grande taille, poids de 50 à 150 kg	Potentiel pour la surveillance et le suivi à très large échelle (frontières, feux de forêt, etc.)
RPAS de très grande taille, poids supérieur à 150 kg	Potentiel pour le transport de fret Capacité à rester en vol pour de très longues périodes

2. Vue générale de la technologie

2.2 TYPES DE DRONES

Il existe de nombreux modèles de drones qui varient par leur forme, leur taille, leur système de propulsion ou encore la source d'énergie utilisée. À l'origine, les drones prirent des formes similaires aux appareils de l'aviation traditionnelle : ils ressemblaient à des avions ou à des hélicoptères. Par la suite, les formes se sont spécialisées afin de répondre au mieux aux missions spécifiques envisagées, en s'affranchissant des éléments superflus et en optimisant certains points cruciaux pour le vol télécommandé. Il importe de bien distinguer le drone en lui-même, qui est une plateforme volante munie d'un système de contrôle à distance, et les instruments qui y sont attachés, à savoir 'la charge utile' [C2]. Bien que le drone ne soit pas un outil de mesure en soi, il est conçu de manière à optimiser l'utilisation des outils qui y sont joints.

On ne reviendra pas en détail sur les aspects physiques liés au vol d'un drone dans ce document. Le lecteur pourra trouver ces informations dans de nombreux ouvrages spécialisés. Rappelons toutefois que la portance est la force qui maintient l'appareil en l'air en le 'tirant' vers le haut. On distingue trois types généraux de drones selon leur conception générale et selon la manière dont la portance est générée; ceux-ci sont détaillés ci-dessous.

2.2.1 DRONES À VOILURE FIXE

Pour les drones à voilure fixe, la capacité à contrecarrer la gravité est assurée grâce à la présence d'une ou de plusieurs ailes rigides. C'est le profil spécifique des ailes qui produit la force portante lorsque l'appareil est soumis à un vent relatif ⁽³⁾. Les drones en forme d'avion standard appartiennent à cette catégorie, ainsi que toute une série d'appareils aux formes plus originales. Quand les ailes sont indiscernables du corps de l'avion, on parle généralement d'une 'aile volante' (voir figure 5).

Les drones à voilure fixe sont capables de voler sur de grandes distances et sont très bien adaptés aux tâches de cartographie. La nécessité de maintenir une vitesse de déplacement minimale et la maîtrise limitée de leurs mouvements ne permettent cependant pas d'effectuer des manœuvres précises autour d'objets. De plus, leur décollage nécessite une vitesse horizontale initiale : il faudra donc les lancer afin d'initier leur vol.



Fig. 5 Drone dit 'aile volante'.

2.2.2 DRONES À VOILURE TOURNANTE

Dans le cas de drones à voilure tournante, le maintien de l'appareil dans les airs est assuré par un ou plusieurs rotors. Chaque hélice, dont le corps est parallèle au sol, exerce une force verticale sur l'air lorsqu'elle se met en rotation. On trouve dans cette catégorie des appareils similaires aux hélicoptères, mais aussi des drones de formes plus spécifiques. L'avantage majeur des drones à voilure tournante réside dans leur aptitude à maintenir un vol stationnaire, qui permet de prendre des photographies dans de meilleures conditions de stabilité, et donc de multiplier les angles de vue sur un objet d'intérêt.

⁽³⁾ Le terme 'vent relatif' désigne le vent subi par un objet en mouvement.

Les hélicoptères sont bien connus dans le monde de l'aviation traditionnelle. Dans ce type d'appareil, c'est un rotor unique (dit 'rotor principal') qui maintient l'appareil dans les airs. Afin d'éviter que l'appareil ne se mette à tourner sur lui-même lorsque le rotor principal tourne, par le principe de l'action et de la réaction, il est indispensable de prévoir un rotor de queue (ou rotor 'anticouple' – voir figure 6).

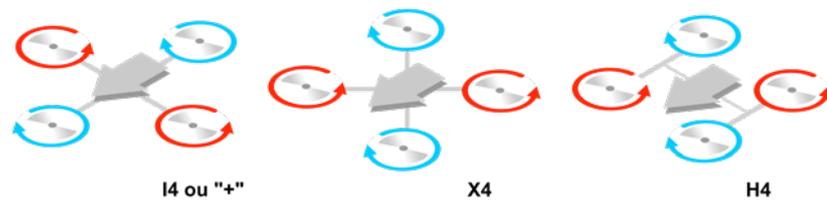


Source : Pulseaero

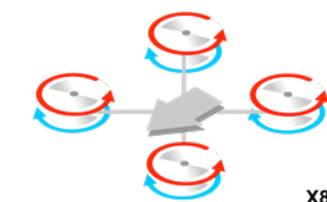
Fig. 6 L'hélicoptère est un sous-type de drone à voilure tournante. Le rotor de queue évite que l'appareil ne se mette à tourner sur lui-même.

Les multicoptères, aussi appelés 'multirotors' ou 'multicopters' en anglais, sont très populaires. Ils sont munis de plusieurs bras au bout desquels sont fixées des hélices identiques. Le nombre d'hélices et leur configuration peuvent être très variés, comme indiqué à la figure 7. Cette figure montre également qu'il y a toujours une alternance du sens de rotation des hélices. En effet, si toutes les hélices tournaient dans le même sens et à la même vitesse, l'appareil entrerait naturellement en rotation autour de son centre de masse.

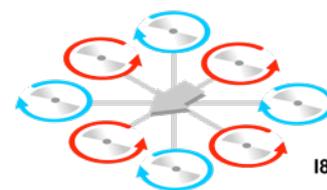
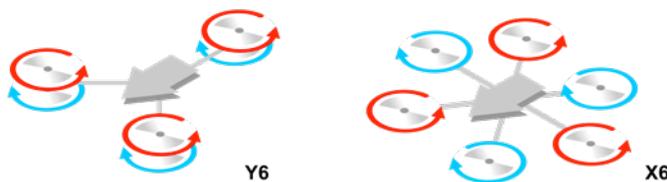
Quadricoptères



Octocoptères



Hexacoptères



Source : CSTC

Fig. 7 Configurations fréquentes des hélices des multicoptères. Le sens de rotation des hélices est indiqué par une flèche colorée.

2. Vue générale de la technologie



Source : CSTC

Fig. 8 Le quadricoptère est un type de drone très populaire grâce à sa simplicité. Exemple d'une solution 'prête à voler'.



Source : Topcon

Fig. 9 Octocoptère de type H8, qui peut continuer à voler même si un des rotors s'arrête de fonctionner.

Le nombre et la configuration des hélices ont une influence sur la stabilité de vol, l'autonomie et la sécurité. Les multicoptères à quatre hélices, ou 'quadricoptères' (voir figure 8) connaissent un franc succès, en raison de leur bon rapport coût/performance. Ils sont de conception simple, mais ne peuvent pas continuer à voler de manière stable si un de leur rotor s'arrête ou est endommagé. On comprendra donc que leur utilisation pour des missions impliquant de voler à proximité ou au-dessus des personnes n'est pas souhaitable. Les hélices sont parfois dédoublées sur chaque bras du drone (modèle Y6 ou X8, par exemple), ce qui permet d'augmenter la sécurité de vol : en cas de défaillance d'un des rotors coaxiaux, l'appareil pourra continuer à voler de manière stable. De façon générale, on peut dire que les hexacoptères (six moteurs) et les octocoptères (huit moteurs – voir figure 9) sont plutôt utilisés par les professionnels.

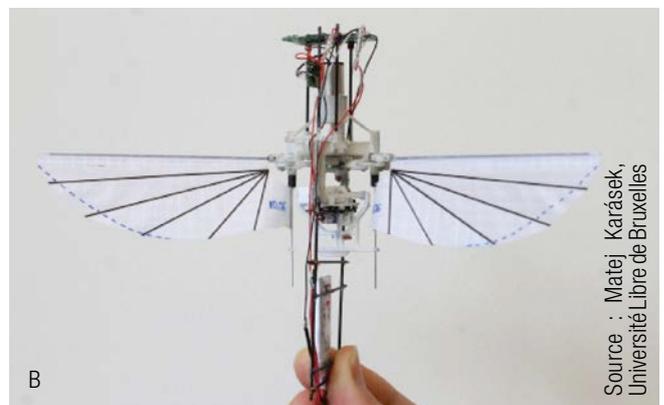
2.2.3 AUTRES SYSTÈMES

Outre les ailes volantes et les multicoptères, qui ont déjà conquis de nombreuses industries, il existe toute une série de systèmes moins clairement définis. Les drones hybrides en font partie; ils tentent de combiner le meilleur des deux mondes, à savoir la vitesse de déplacement et l'autonomie de l'aile volante avec la capacité d'effectuer un vol stationnaire. Le VertiKUL est un exemple de plateforme hybride (voir figure 10A). Les étudiants en Master de la KUL l'ont conçu en vue de pouvoir transporter une charge d'un kilogramme à une distance allant jusqu'à 30 km [C1].

Il existe des types de drones plus originaux encore. Parmi ceux-ci, on peut mentionner les drones en forme de ballons ou encore les 'ornithoptères' [C2] qui volent grâce à des ailes battantes, tels un insecte, un oiseau ou encore une chauve-souris (voir figure 10B).



Source : Katholieke Universiteit Leuven



Source : Matej Karásek, Université Libre de Bruxelles

Fig. 10 Il existe de nombreux types de drones qui ne sont pas à proprement parler des voilures fixes ou des voilures tournantes. A. Drone hybride combinant une haute vitesse de déplacement avec la capacité de décoller à la verticale. B. Le biomimétisme au travers d'un drone 'ornithoptère'.

2.3 LE CHOIX D'UN DRONE

Le choix d'un appareil représente une tâche complexe. C'est évidemment la nature des missions envisagées ainsi que le contexte de réalisation de celles-ci qui guideront le processus de sélection. Le tableau 2 synthétise quelques critères permettant de différencier les trois types de drones les plus courants. Notons que dans le secteur de la construction, seuls les ailes fixes et les multicoptères sont communément utilisés. Les ailes fixes restent néanmoins réservées à des missions à grande échelle, pour le relevé de vastes terrains, de quartiers ou même de villes.

Tableau 2 Critères importants pour le choix d'un type de drone.

Type de drone	Ailes volantes	Hélicoptères	Multicoptères
Vol stationnaire et décollage vertical	Non	Oui	Oui
Difficulté de pilotage	Basse	Haute	Moyenne
Complexité mécanique	Moyenne	Haute	Basse
Complexité électronique	Basse	Moyenne	Haute
Coût et difficulté des réparations après un crash	Bas	Hauts	Moyens
Distance de vol	Longue	Moyenne	Courte
Autonomie de vol	Longue	Moyenne	Courte

Pour chaque catégorie de drone, on trouve de nombreux modèles sur le marché, avec une grande diversité de formes et de performances. A titre d'exemple, voici quelques paramètres qui peuvent servir à la sélection d'un modèle pertinent parmi les multicoptères disponibles.

La taille

Là où un petit multicoptère permettra de réaliser des vols discrets, et de limiter les risques pour d'éventuels vols en intérieur, seuls les multicoptères les plus grands pourront embarquer de l'équipement lourd. Les plus gros appareils impliquent toutefois une logistique plus contraignante (en termes de sécurité et de transport, par exemple).

La sécurité

Il existe de nombreux paramètres qui permettent à l'acheteur d'évaluer le niveau de sécurité d'un drone. On peut citer, entre autres, le nombre de moteurs, la redondance électronique, la présence de protections au niveau des hélices, les capteurs d'évitement d'obstacles, ou encore les fonctions de récupération en cas de perte de signal.

La modularité en termes de système

L'adaptabilité du système de drone est essentielle et varie fortement d'un fabricant à l'autre. Ce critère s'avère particulièrement important lorsque les coûts d'acquisition du drone sont élevés. Certains drones sont conçus comme un assemblage de composants électroniques facilement remplaçables et/ou améliorables; d'autres sont entièrement 'fermés' et nécessitent un retour en usine pour toute réparation. Certains fabricants proposent aussi d'incorporer de l'équipement que l'acheteur pourra activer par la suite, ce qui peut se révéler avantageux comme investissement à long terme.

La modularité en termes de charge utile

Il importe d'analyser le type et le nombre d'outils que le multicoptère peut embarquer. Certains modèles disposent uniquement d'une caméra non amovible, aucun autre équipement ne pouvant être monté sans risquer de modifier le comportement de vol. A l'autre extrême, des modèles professionnels pourront accepter une large gamme de capteurs, non spécifiques à la marque du fabricant du drone.

L'autonomie

L'autonomie de vol constitue un paramètre crucial. Elle peut aller d'une petite dizaine de minutes jusqu'à près d'une heure pour certains modèles très spécialisés. De manière générale, beaucoup de modèles offrent un temps de vol effectif d'une vingtaine de minutes. Certains modèles permettent d'embarquer plusieurs batteries selon la mission envisagée.

2. Vue générale de la technologie

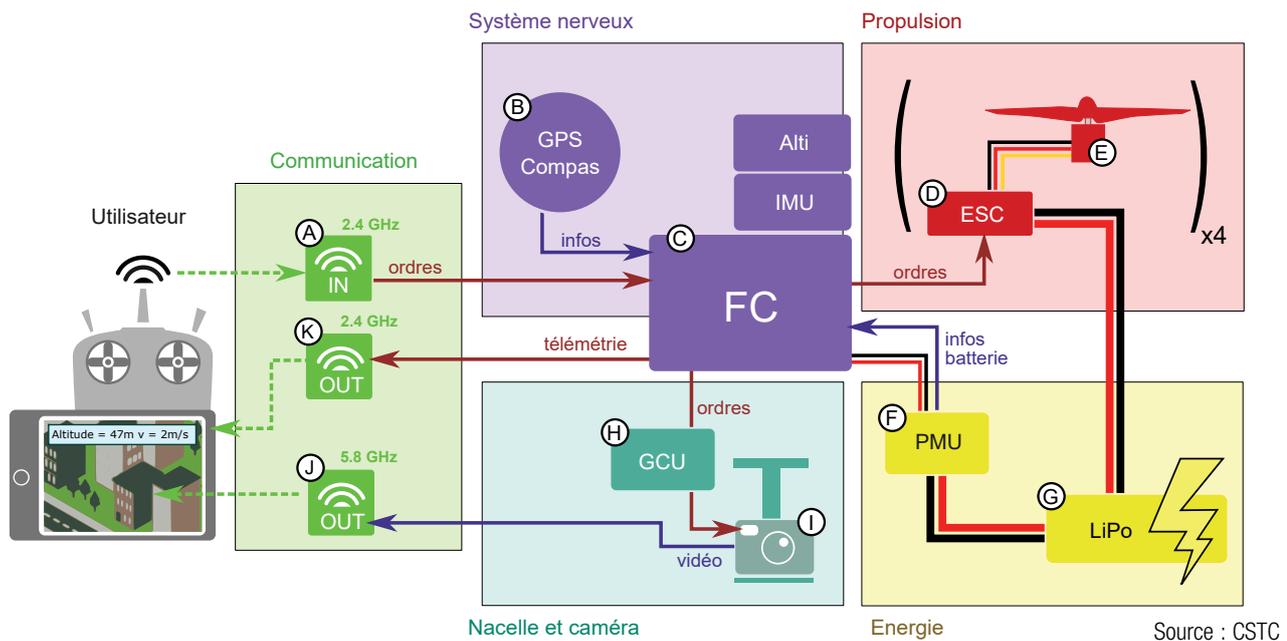
L'intelligence

Grâce à de nombreuses technologies, il est possible de rendre un drone plus 'intelligent', en lui permettant de mieux percevoir son environnement, de mieux se localiser dans l'espace et éventuellement d'adapter son vol en fonction des contraintes rencontrées. Poussée à son paroxysme, cette intelligence électronique offre des drones complètement autonomes, capables de réaliser des missions de manière automatique.

On peut en outre prendre en compte la durée de vie estimée du RPA (en heures de vol), la résistance au vent et aux intempéries, la résistance aux champs magnétiques parasites, les vitesses de déplacement verticale et horizontale, la portée, ou encore le bruit généré par le RPA et perçu au niveau du sol.

3. ANATOMIE D'UN MULTICOPTÈRE ÉLECTRIQUE ET DE SES ÉQUIPEMENTS

Les multicoptères sont largement répandus et permettent de réaliser de nombreuses missions dans le secteur de la construction, grâce à leurs qualités mentionnées dans le chapitre précédent. Les appareils pilotables à distance (RPA) fonctionnant à l'énergie électrique seront décrits plus en détail ici. La figure 11 illustre les composants d'un quadricoptère de type X4 muni d'une caméra, qui reste aujourd'hui l'outil le plus fréquemment embarqué sur les drones professionnels.



A : Récepteur	E : Moteur <i>brushless</i> (sans balais)	I : Nacelle et caméra
B : GPS et compas	F : Contrôleur d'alimentation (PMU = <i>Power Management Unit</i>)	J : Emetteur vidéo
C : Contrôleur de vol (FC = <i>Flight Controller</i> , Alti = altimètre, IMU = <i>Inertial Measurement Unit</i>)	G : Batterie LiPo	K : Module de télémétrie
D : Contrôleur de vitesse électronique (ESC = <i>Electronic Speed Controller</i>)	H : Contrôleur de prise de vue (GCU = <i>Gimbal Control Unit</i>)	

Fig. 11 Schéma simplifié du fonctionnement d'un quadricoptère. Il s'agit d'un schéma idéalisé; les modèles disponibles sur le marché peuvent s'en écarter.

3.1 COMPOSANTS STANDARD

3.1.1 SYSTÈME DE PROPULSION

Chaque hélice du multicoptère est associée à un moteur qui transforme l'énergie électrique en provenance des batteries en énergie mécanique de rotation. Les moteurs à courant continu sans balais, plus communément appelés 'moteurs *brushless*', dominent aujourd'hui le marché des drones professionnels. La transformation du courant continu issu de la batterie en un signal adapté au moteur est réalisée par un petit circuit électrique appelé '*Electronic Speed Controller*' (ESC). Chaque ESC est capable de contrôler la vitesse de rotation du moteur qui y est associé. Les ESC jouent donc un rôle central dans le contrôle des mouvements d'un drone : ils permettent d'agir indépendamment sur chaque moteur et donc sur chaque hélice.

3. Anatomie d'un multicoptère électrique et de ses équipements

En vol, le poids de l'appareil exercera une force sur les hélices [A1]. Les propriétés mécaniques de celles-ci s'avèrent donc essentielles. Plus les hélices sont grandes, plus la portance sera importante. Cependant, à vitesse de rotation égale, les contraintes mécaniques exercées sur de grandes hélices se révéleront plus fortes que sur de petites hélices. En outre, les moteurs associés devront être plus puissants, et seront donc plus gourmands en énergie.

3.1.2 CHÂSSIS

Le châssis est la structure du drone sur laquelle viennent se fixer tous les autres composants, à savoir les pièces électroniques, les moteurs ou encore les différents capteurs. Cette structure peut prendre des formes très différentes selon le type de drone. A puissance égale, un drone constitué de composants plus légers pourra soulever une charge plus importante. Cela explique la recherche constante de matériaux légers et résistants pour fabriquer le châssis.

Un multicoptère comporte en général des bras sur lesquels sont fixés les moteurs. Ces bras peuvent être attachés mécaniquement à un élément central du châssis ou moulés directement dans un châssis monobloc. La longueur des bras dépendra de l'importance accordée à la stabilité et à la manœuvrabilité du drone. Si l'on privilégie la stabilité, on optera pour des bras longs, alors que des bras courts rendront le drone plus réactif. Pour plus de facilité lors du transport, certains châssis disposent d'éléments repliables (voir figure 12). Les trains d'atterrissage peuvent être considérés comme faisant partie du châssis. Ils permettent au drone de se poser sans endommager l'équipement embarqué. Il est également possible de monter un système de train rétractile à distance, afin de ne pas gêner la prise de vue.



Fig. 12 Des bras repliables rendent le transport du drone plus facile.

3.1.3 SYSTÈME DE COMMUNICATION

Le système de communication radio est l'équipement qui assure l'interface entre l'humain et la machine. Le télépilote actionne les différents leviers et boutons sur la télécommande (voir § 3.3.1, p. 28) et les ordres correspondants sont communiqués par ondes radio via un émetteur vers un récepteur installé sur le drone. Le drone, en retour, peut transmettre diverses informations au télépilote : altitude de vol, vitesse de déplacement, pourcentage d'énergie disponible de la batterie. C'est ce que l'on appelle la télémétrie. A l'heure actuelle, on utilise principalement les bandes de 2,4 GHz et 5,8 GHz pour la communication avec les drones.

3.1.4 SOURCE ET GESTION DE L'ÉNERGIE

La plupart des multicoptères électriques sont équipés de batteries de type *lithium-ion-polymer* ou LiPo. Ces modèles de batteries permettent d'emmagasiner suffisamment d'énergie et leur poids est moindre que les batteries *lithium-ion*, à capacité égale. En d'autres termes, elles possèdent le meilleur rapport puissance/masse. De plus, leur capacité à offrir une décharge rapide, grâce à leur faible résistance interne, se révèle très utile. Ce type de batterie est toutefois hautement inflammable, et il est donc essentiel de prendre ce risque en compte lors de leur manipulation, leur chargement et leur stockage.

3. Anatomie d'un multicoptère électrique et de ses équipements

Pour le télépilote du drone, il est précieux de connaître précisément le niveau de batterie lors d'un vol. Il pourra ainsi anticiper le moment opportun pour ramener le drone dans la zone d'atterrissage définie dans le plan de vol. Dans le meilleur des cas, un drone à court de batterie entamera une séquence d'atterrissage d'urgence automatique, généralement une descente verticale depuis l'endroit où il se trouve dans les airs. Il est bien sûr fortement déconseillé d'atteindre cette limite. Afin d'éviter de se retrouver dans une situation dangereuse, la plupart des drones modernes disposent d'un système de contrôle continu de la batterie permettant d'augmenter la sécurité du vol. Dans certains cas, un microcontrôleur est spécifiquement chargé de gérer l'énergie au sein du drone et de la distribuer vers les divers composants : on parle parfois de PMU pour *'Power Management Unit'*.

3.1.5 'SYSTÈME NERVEUX' CENTRAL

On a décrit jusqu'à présent le châssis, sur lequel sont fixés la batterie et les moteurs. Ces derniers sont eux-mêmes reliés à des ESC qui les alimentent et régulent leur vitesse de rotation. On a également vu que le télépilote actionne une télécommande qui transmet des signaux par radio à un récepteur monté sur le châssis. Sur les systèmes composés de plusieurs moteurs tels qu'un multicoptère, le **contrôleur de vol, aussi appelé autopilote et parfois désigné par les initiales MCU (pour 'Microcontroller Unit') ou FC (pour 'Flight Controller')**, traduit les signaux de la télécommande, communiqués par le récepteur radio, en ordres coordonnés qu'il envoie aux ESC. Il effectue la transition de la langue 'télécommande' (pousser le manche de contrôle ⁽⁴⁾ gauche vers le haut, par exemple) à la langue 'mouvements' (effectuer une translation vers le haut).

Les drones récents sont pourvus d'une multitude de dispositifs électroniques et sont capables de corriger leur vol en continu. **Les corrections sont basées sur des mesures concrètes prises à l'aide de capteurs de vol**, qui permettent au drone d'évaluer sa situation : magnétomètre, gyroscopes, accéléromètres ou encore capteurs de pression. **L'unité de mesure inertielle, ou IMU pour 'Inertial Measurement Unit', est le dispositif électronique qui compile les données de mouvement et les envoie au contrôleur de vol.** Si le drone est équipé d'un GPS, il pourra même estimer sa position géographique et éventuellement suivre un itinéraire prédéfini. La géolocalisation permet aussi de référencer les données collectées lors du vol.

3.2 CHARGE UTILE ET OUTILS EMBARQUÉS

Selon leurs propriétés, les drones peuvent supporter une certaine **charge utile** ⁽⁵⁾. Celle-ci correspond au poids que peut soulever le drone en plus de son poids propre sans nuire à sa capacité de voler. Cette **'réserve de poids'** permet d'embarquer divers outils ou capteurs additionnels.

En fonction de la mission envisagée, différents types d'outils devront être embarqués. Sur certains modèles de drones, ces outils sont fixes et ne peuvent être remplacés par l'utilisateur. C'est le cas de nombreux multicoptères destinés au grand public, sur lesquels on trouve une petite caméra fixée de manière définitive. La plupart de ces drones 'grand public' sont conçus pour être légers, afin de faciliter le transport. Le poids réduit des équipements embarqués permet également d'allonger le temps de vol. A l'opposé, les drones professionnels sont souvent conçus comme des porte-outils modulables, et leur charge utile peut être utilisée librement pour transporter différents types de caméras ou de capteurs, parfois très lourds. Cela nécessite des moteurs plus puissants, avec des batteries aptes à les alimenter, ce qui donne donc au final des drones plus imposants.

3.2.1 PHOTOGRAPHIE ET VIDÉOGRAPHIE PAR DRONE

La photographie ou la vidéographie restent les tâches le plus couramment effectuées avec des drones. A cette fin, on équipe le drone d'une ou de plusieurs caméras ⁽⁶⁾ qui lui permettront de capturer son environnement depuis les airs. **Les possibilités en termes d'équipement photographique sont très larges, allant de la petite caméra dite d'action jusqu'aux appareils photo professionnels à objectifs interchangeables, à plusieurs milliers d'euros.** Rappelons d'abord la fonction et les propriétés des éléments composant une caméra.

⁽⁴⁾ Le terme 'stick' est répandu dans le langage courant.

⁽⁵⁾ En anglais, on retrouve communément le terme 'payload'.

⁽⁶⁾ Au sens large, y compris les appareils photo.

3. Anatomie d'un multicoptère électrique et de ses équipements

Principes de base

Le **capteur photographique** est l'élément photosensible d'une caméra ou d'un appareil photo. Il est composé d'un ensemble de microéléments (ou 'photosites') qui capturent la lumière et la retranscrivent en information électrique par effet photoélectrique. C'est l'équivalent du film en photographie argentique. Il existe deux grandes familles de capteurs photo dans l'industrie, les capteurs de type CCD (*Charge-Coupled Device*) et les capteurs de type CMOS (*Complementary Metal-Oxide Semiconductor*). A l'heure actuelle, les capteurs CMOS dominent le marché de l'électronique et sont présents dans la plupart des appareils photo numériques et des smartphones.

Un capteur se caractérise avant tout par sa résolution, à savoir le nombre de photosites qui le composent. Cette résolution est exprimée en **mégapixels (MP)**. Plus le capteur comporte de mégapixels, plus il peut retranscrire de détails dans l'image capturée. Beaucoup de capteurs dépassent aujourd'hui les 20 MP. La deuxième caractéristique essentielle du capteur est sa taille. A résolution égale, un grand capteur offre généralement une meilleure qualité d'image. Il existe toute une série de tailles de capteur standard, dont les plus courantes sont :

- le capteur APS-C, d'une taille de 22,2 × 14,8 mm ou 23,6 × 15,7 mm selon la marque
- le capteur plein format, d'une taille de 36 × 24 mm
- le capteur micro quatre-tiers (4/3"), d'une taille de 17,3 × 13 mm
- le capteur 1", d'une taille de 13,2 × 8,8 mm.

Dans une vidéo, la résolution des images s'avère bien plus faible. Ainsi, une vidéo *full HD*, aussi appelée '1080p', est un enchaînement d'images de 1920 sur 1080 pixels, soit seulement 2 mégapixels. Un petit capteur peut donc convenir parfaitement pour la vidéo, mais beaucoup moins pour la photographie. **Le nombre d'images capturées par seconde**, ou FPS (pour 'Frame per Second'), constitue un autre paramètre essentiel pour la vidéographie. Ce nombre détermine la fluidité du rendu, mais aussi la capacité de réaliser des effets de ralenti qui peuvent se révéler précieux pour améliorer la qualité d'une mission de type promotionnel.

L'**obturateur** est un système permettant d'exposer le capteur à la lumière pendant une durée déterminée (en général très courte) lorsque l'utilisateur déclenche une prise de vue photographique. **On peut régler la vitesse d'obturation, à savoir le temps d'exposition du capteur.** Plus cette vitesse est rapide, moins le capteur recevra de lumière. Une vitesse d'obturation rapide est donc adaptée aux conditions lumineuses intenses. Entièrement mécaniques à l'origine, beaucoup d'obturateurs sont aujourd'hui électroniques. Parmi ceux-ci, les obturateurs à effet roulant (*rolling shutter*) sont très fréquemment associés aux capteurs CMOS modernes. Ce type d'obturation peut cependant causer des phénomènes de déformation de l'image lors de la réalisation de vidéos si les objets filmés sont en mouvement (voir figure 13). Cela peut s'avérer problématique, en particulier pour les études photogrammétriques. Par conséquent, les fabricants de caméras destinées aux drones mentionnent souvent la présence d'un obturateur dit 'global' (*globalshutter*), où l'entièreté des pixels sont capturés en une fois.



Fig. 13 Effet d'un obturateur électronique lorsque l'objet photographié est en mouvement par rapport au point de prise de vue.

L'**objectif photographique** se compose d'un ensemble d'éléments optiques, ou lentilles, combinés de manière à capturer la réalité et à focaliser la lumière sur le capteur. **Selon les éléments optiques choisis, l'objectif photographique peut capturer un angle de vue plus ou moins grand** (voir figure 14, p. 21). Cet angle de vue est exprimé par la **focale** de l'objectif, elle-même exprimée en millimètre. Un objectif de 24 mm de focale est dit 'grand-angle' ou 'à courte focale', car il permet de capturer une large portion du champ de vision, là où un objectif de 200 mm est appelé 'téléobjectif'. Dans les cas où une distance de sécurité doit être maintenue par rapport à l'objet photographié (éoliennes, par exemple), il peut s'avérer judicieux de privilégier de longues focales (plus de 50 mm). Si, au contraire, les capacités de recul sont limitées, on optera de préférence pour de petites focales. Notons que le champ de vision à une focale donnée est également déterminé par le type de capteur

3. Anatomie d'un multicoptère électrique et de ses équipements

utilisé. Un objectif grand-angle d'une focale donnée couvrira un champ plus grand sur un capteur plein format que sur un capteur de type APS-C.



Fig. 14 Deux photos du même objet prises avec des focales différentes. A. Le téléobjectif permet de recentrer l'angle de vue sur des détails de l'objet. B. L'objectif grand-angle permet d'obtenir un champ large de la scène.

Pour une même focale, on trouve de nombreux modèles d'objectifs sur le marché, avec des niveaux de qualité très variables. Pour les relevés par drones, c'est souvent la netteté de l'image produite qui prime. L'effet de flou d'arrière-plan, populaire en photographie artistique et rendu possible par les objectifs dits 'à grande ouverture', est en général peu pertinent pour les études techniques réalisées en journée. De plus, ces objectifs à grande ouverture sont nettement plus lourds que ceux de focale identique possédant une ouverture maximale plus petite.

Depuis des décennies, on trouve de nombreux objectifs de type zoom. Par opposition aux objectifs dits 'à focale fixe', les zooms permettent de modifier la focale sur une plage bien définie. Les objectifs dont la focale peut être ajustée de 24 à 70 mm ou de 70 à 200 mm sont ainsi très répandus. Le zoom offre à l'opérateur du drone une flexibilité sans pareil pour les missions d'inspection ou de surveillance. Dans le cas d'études photogrammétriques, on préconise, au contraire, l'emploi de focales fixes. Notons que certains appareils photo proposent un zoom numérique, qui entraîne une perte de qualité d'image.

Caméra embarquée

Il existe plusieurs grandes familles de caméras transportables sur un drone (voir tableau 3, p. 22, pour une comparaison). On trouve d'abord les caméras miniatures dont la principale qualité est un poids réduit. Ces petits dispositifs minimalistes sont en général dédiés entièrement à la capture de vidéos. Si la qualité du rendu visuel laisse parfois à désirer, ces caméras peuvent s'avérer très pratiques pour obtenir un retour vidéo du drone à moindre coût. Certains petits drones très maniables sont d'ailleurs conçus pour des courses dites FPV (First Person View), où le télépilote utilise le retour vidéo pour piloter de manière immersive.

Les caméras d'action sont plus lourdes, mais aussi bien plus performantes que les caméras miniatures. Elles ont été développées initialement pour le monde du sport, afin d'être embarquées sur un casque, une sangle ou même un véhicule. Ces appareils montrent donc les qualités requises pour l'embarcation sur un drone : de la robustesse, d'une part, au travers de la résistance aux chocs et aux intempéries, et du minimalisme, d'autre part, grâce à une conception visant à réduire autant que possible le poids et la taille. Avec des caméras à peine plus grandes qu'une boîte d'allumettes, il est déjà possible de réaliser des vidéos en résolution 4K. Les photos sont possibles, mais souvent limitées en résolution et en qualité.

Un drone peut aussi embarquer tout type d'appareil photo standard, à condition qu'il soit capable de le soulever dans les airs. Il existe bien sûr une grande étendue de modèles d'appareils photo. Il y a d'abord les appareils compacts, dont le poids est raisonnable, mais qui ne proposent pas d'objectifs interchangeables. Bien que la qualité d'image soit satisfaisante, ce type d'appareil est déconseillé pour les relevés photogrammétriques (voir § 4.2.1, p. 34) ou pour la réalisation de vidéos

3. Anatomie d'un multicoptère électrique et de ses équipements

Tableau 3 Types de caméras fréquemment utilisées avec des drones et propriétés types.

	Taille de capteur	Résolution en photo	Résolution en vidéo	Etendue des réglages	Objectifs interchangeables	Zoom optique maximum	Poids	Types de missions
Caméra miniature	1/4" 1/3,2"	1 – 5 MP	< 1080p	Très faible	Non	1x	< 20 g	Vol avec retour vidéo, vol FPV
Caméra compacte de type sport ou action	1/2,3"	5 – 12 MP	1080p (120 fps) 4K (60 fps)	Faible	Non	1x	< 200 g	Travail vidéoographique de base (quadricoptère de moins de 2 kg)
Caméra intégrée aux drones grand public de gamme supérieure			1080p (120 fps) 4K (60 fps)	Faible	Non	1x (1)	< 100 g	Travail vidéoographique ou photographique de base (quadricoptère de moins de 2 kg)
Appareil photo compact	1/2,3" 1"	12 – 20 MP	1080p (60 fps) 4K (30 fps)	Faible à bonne	Non	3 à 10x (2)	< 500 g	Travail photographique de base, inspection générale (hexacoptère ou octocoptère < 5 kg)
Appareil photo 'bridge'			Moyenne à bonne	Non	Non	5 à 20x (3)	< 1 kg	Travail photographique de base, inspection de détails fins, surveillance (hexacoptère ou octocoptère de moins de 10 kg)
Appareil photo hybride avec capteur 4/3"	4/3"	15 – 50 MP	1080p (120 fps) 4K (30 fps)	Bonne à très bonne	Oui	En fonction de l'objectif	< 1 kg (hors objectif)	Travail photographique ou vidéoographique avancé, inspection de détails fins (hexacoptère ou octocoptère < 5 – 10 kg)
Appareil photo hybride avec capteur supérieur à 4/3"	APS-C Plein format	24 – 50 MP						Travail photographique ou vidéoographique avancé, inspection de détails fins, photographie de précision (hexacoptère ou octocoptère < 5 – 10 kg)
Appareil photo réflex	APS-C Plein format Moyen format	20 – 100 MP	1080p (120 fps) 4K (30 fps)	Bonne à très bonne	Oui	En fonction de l'objectif	< 2 kg (hors objectif)	Travail photographique ou vidéoographique avancé, inspection de détails fins, photographie de précision (hexacoptère ou octocoptère < 10 kg)
Caméra professionnelle pour drone, amovible et à objectifs interchangeable	4/3" APS-C Plein format Moyen format	15 – 100 MP	1080p (120 fps) 4K (60 fps) 6K (30 fps)	Bonne à très bonne	Oui	En fonction de l'objectif	< 1 kg (hors objectif)	Travail photographique ou vidéoographique avancé, inspection de détails fins, photographie de précision (hexacoptère ou octocoptère < 5 kg)
Caméra professionnelle pour drone, amovible et à objectif fixe	< 1"	< 5 MP	≤ 1080p	Moyenne	Non	10 à 30x	< 500 g	Inspection de détails fins, surveillance (hexacoptère ou octocoptère < 5 kg)

(1) De rares modèles proposent un zoom de plage réduite (typiquement 3x).

(2) Certains appareils vont cependant jusqu'à 30x.

(3) Certains appareils vont cependant jusqu'à 60x.

3. Anatomie d'un multicoptère électrique et de ses équipements

professionnelles. Les objectifs intégrés disposent, en revanche, d'un niveau de zoom confortable pour les missions d'inspection. Les **appareils 'bridge'** sont en général légèrement plus qualitatifs, mais aussi plus lourds. Les **appareils réflex** offrent une qualité d'image supérieure; ils comportent néanmoins de nombreux éléments qui augmentent leur poids et qui ne sont pas nécessairement utiles pour l'exploitant du drone (viseur optique imposant avec système de prise et miroir). Les **appareils photo hybrides** leur sont préférés dans bien des cas, car leur qualité d'image tend de plus en plus vers celle de l'appareil réflex, avec un poids et un encombrement moindre. **Ce type d'appareil s'avère extrêmement polyvalent et peut répondre aux spécifications de nombreuses missions.** Notons enfin que les caméras cinématographiques professionnelles seront rarement utilisées dans la construction, où on leur préfère souvent de l'équipement plus léger. De plus en plus d'appareils photo sont en effet capables de filmer en 4K, avec une bonne qualité d'image.

Outre ces catégories générales, il faut différencier les caméras et appareils photo standard, à savoir ceux qui sont non spécifiques au monde du drone, de ceux spécifiquement développés par les fabricants de drones ou par des fabricants visant le marché du drone. On les appellera ici **'caméras pour drone'**. On peut les répartir en trois catégories. D'une part, il existe **des caméras pour drone qui se placent, en termes de spécifications, entre la caméra sport et l'appareil photo compact.** On les trouve généralement sur les drones de la gamme supérieure destinée au grand public. Dans la plupart des cas, ce type de caméra pour drone est non amovible. En second lieu, on trouve **des caméras pour drone de très haute qualité qui reprennent les propriétés photographiques typiques des appareils photo hybrides,** en s'affranchissant des éléments superflus. Elles en gardent les qualités principales : des objectifs interchangeables couplés à un capteur de grande qualité pour la photographie et la vidéo. Enfin, certaines caméras pour drones tendent plutôt à atteindre un haut niveau de zoom associé à un capteur efficace pour la vidéo, avec un poids réduit.

Nacelle et contrôle de la caméra

La nacelle (7) est un dispositif qui maintient la caméra durant le vol, s'assure de sa stabilité et réduit la transmission des vibrations de l'appareil à la caméra; ses mouvements peuvent éventuellement être contrôlés à distance. Il s'agit bien entendu d'un élément essentiel et les systèmes les plus perfectionnés peuvent s'avérer très coûteux. Le prix est corrélé au poids de la caméra à soutenir ainsi qu'au nombre d'axes de stabilisation, au nombre de mouvements contrôlables et à la précision de chaque mécanisme.

Les trois axes de rotation potentiels d'une nacelle sont indiqués à la figure 15. Chaque axe de stabilisation active et/ou de rotation réglable est pris en charge par un moteur contrôlé par des dispositifs électroniques de précision. L'unité de contrôle électronique est parfois séparée du corps de la nacelle (GCU pour **'Gimbal Control Unit'**). La stabilisation peut être conçue

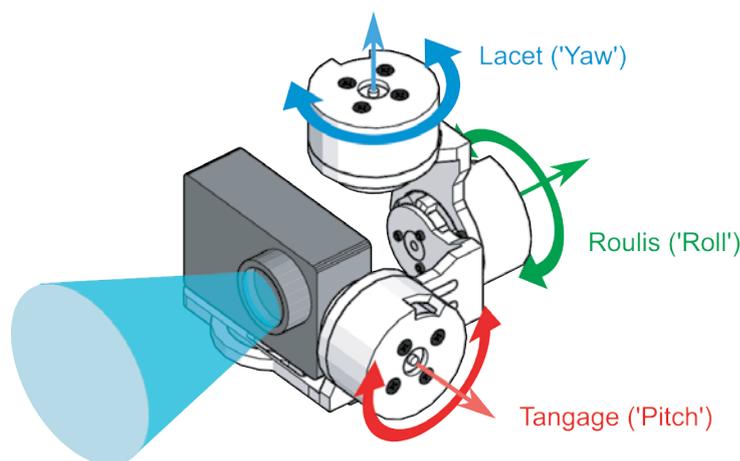


Fig. 15 Schéma des trois axes de rotation possibles pour une nacelle de drone.

(7) Le terme anglais *'gimbal'* est souvent utilisé. Chez certains constructeurs, on parle aussi simplement de 'stabilisateur'.

3. Anatomie d'un multicoptère électrique et de ses équipements

uniquement de façon à amortir les chocs ou peut compenser les mouvements du drone de manière plus perfectionnée, afin de garantir l'image la plus droite possible. Les nacelles les plus abordables se limitent généralement à un mouvement réglable de tangage et parfois à une stabilisation en lacet et en roulis (voir figure 16A). Viennent ensuite les modèles plus complets, disposant de trois véritables axes de rotation, qui permettent un vrai travail professionnel au niveau vidéographique (voir figure 16B). Pour les missions d'inspection sur un objet fixe comme un bâtiment, l'opérateur n'aura pas strictement besoin d'autant de liberté de mouvement. La qualité de la stabilisation et l'amplitude du mouvement de tangage seront bien plus cruciales.

S'il existe des fabricants spécifiques pour les nacelles, beaucoup de fabricants de drones proposent leurs propres dispositifs. Dans ce deuxième cas, la nacelle peut être interchangeable ou, au contraire, solidement ancrée au drone. La caméra peut, elle aussi, être solidaire de la nacelle ou facilement détachable. La position de la nacelle sur le drone est un autre exemple de paramètre à prendre en compte. L'inspection d'une structure par le dessous (le tablier d'un pont, par exemple) peut en effet nécessiter de placer une nacelle sur le dessus du drone.

En bref, le marché offre énormément de produits, et l'exploitant du drone devra trouver un modèle idéal en fonction des missions à réaliser. Parfois, il n'aura d'autre choix que de concevoir une solution sur mesure en combinant des éléments existants sur le marché avec des dispositifs plus artisanaux.



Fig. 16 Il existe une grande variété de nacelles, ces dispositifs qui portent la caméra et assurent sa stabilité. A. Combinaison nacelle/caméra intégrée sous le drone. B. Nacelle professionnelle pouvant embarquer une très lourde caméra cinématographique et se fixant sous le drone.



3.2.2 DISPOSITIFS DE VISION AVANCÉS

La lumière visible ne constitue qu'une fraction du spectre électromagnétique (voir figure 17). Bien que les caméras classiques soient adéquates pour de nombreuses missions, des tâches d'inspection plus poussées peuvent requérir l'utilisation d'équipements spécifiques.

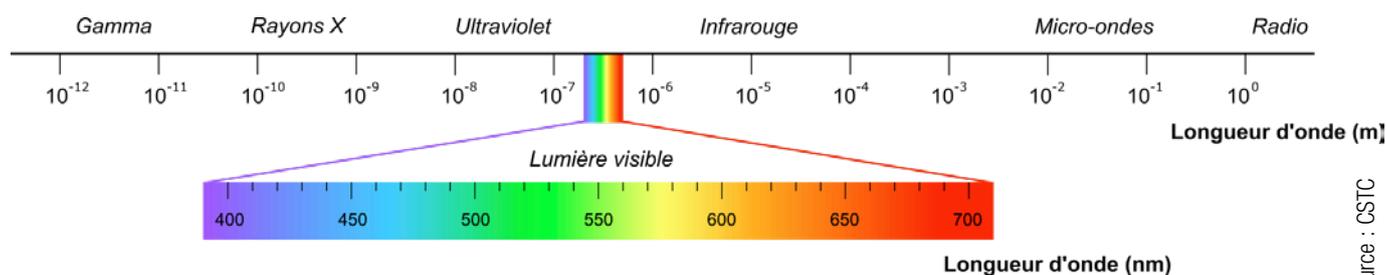


Fig. 17 La lumière visible ne constitue qu'une partie du spectre électromagnétique.

3. Anatomie d'un multicoptère électrique et de ses équipements

Les **caméras thermographiques** sont, par exemple, très utiles pour le diagnostic des bâtiments et des installations. Elles permettent de mettre en évidence les différences de température à la surface des objets filmés. Grâce au drone, l'expert pourra obtenir des images thermographiques inédites, de toitures notamment, ou travailler en milieu inhospitalier.

La **caméra multispectrale** est un autre équipement de pointe qui permet, comme son nom l'indique, d'enregistrer plusieurs images en simultanément sur des bandes spécifiques du spectre lumineux, dans le visible, l'infrarouge et l'ultraviolet. De plus en plus commune dans le domaine de la recherche agricole, forestière ou géologique (voir figure 18), son utilisation pour l'étude des bâtiments devrait se répandre dans les années à venir (voir figure 19).



Fig. 18 Caméra multispectrale montée sur un multicoptère Y6 par l'Université catholique de Louvain.

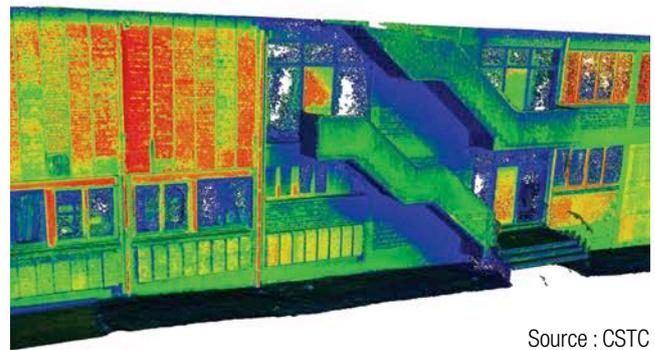


Fig. 19 Analyse multispectrale d'une façade : mise en évidence de la lumière réfléchie dans la composante verte.

Dans certains cas, la mission peut requérir l'emploi de plusieurs caméras identiques, assemblées de manière à couvrir plusieurs angles de vue en même temps. On parle alors en anglais de *'multi-camera rig'*, que l'on peut traduire par 'assemblage multicaméra'. Ces assemblages s'utilisent pour opérer des relevés photogrammétriques (voir § 4.2.1, p. 34) de larges zones au moyen d'appareils photo de haute qualité (voir figure 20). On obtient simultanément de nombreux points de vue sur le terrain à numériser, ce qui améliore la qualité de sa reconstruction numérique. Ces montages complexes d'appareils photo trouvent particulièrement leur sens **lorsque l'on souhaite limiter le temps de vol dans le cas d'un relevé avec des avions ou des hélicoptères**. Davantage de points de vue sont en effet capturés en un seul passage. Etant donné que les drones permettent justement de réduire le coût d'opération du vol, l'emploi d'un tel équipement s'avère moins pertinent.

Les assemblages multicaméra se révèlent également utiles pour la **production de vidéos de réalité virtuelle à 360°**. Dans ce cas, des vidéos sont enregistrées simultanément dans toutes les directions et assemblées numériquement. Un utilisateur muni d'un casque de réalité virtuelle peut parcourir le fichier résultant de manière très immersive : en bougeant sa tête de gauche à droite et de bas en haut lors du visionnage, il peut observer les variations d'angle de vue correspondantes.



Fig. 20 Assemblage d'appareils photo réflex selon un agencement particulier pour optimiser le relevé photogrammétrique. Vu son poids, ce type de matériel n'est pas compatible avec un multicoptère standard.

3. Anatomie d'un multicoptère électrique et de ses équipements

Divers constructeurs offrent aussi la possibilité de **monter plusieurs équipements de vision sur le drone en même temps**. Cela permet d'améliorer sensiblement le niveau d'analyse. Combiner une caméra thermique à une caméra traditionnelle (voir figure 21) est, par exemple, très pratique pour l'expert qui devra analyser les images. Sans les images en couleur, il peut être difficile d'interpréter les seules données issues du spectre infrarouge. Notons également que si la caméra RVB est synchronisée avec la caméra thermique, on pourra éventuellement texturer un modèle 3D généré par photogrammétrie à l'aide des images thermiques. La combinaison d'équipements rend le drone plus polyvalent, au prix d'une plus grande puissance nécessaire et d'une complexité électronique accrue.



Fig. 21 Drone équipé de deux outils différents : une caméra munie d'un zoom et une caméra thermique.

3.2.3 TRAITEMENT DES IMAGES CAPTURÉES

Lors d'une prise de vue réalisée par drone, une série d'images ou de séquences vidéo est capturée. Il peut s'avérer très **utile d'appliquer des traitements numériques à ces fichiers, à savoir les transformer afin d'en extraire des données pertinentes ou de faciliter un emploi ultérieur**. Un signal vidéo, par sa nature continue, offre également la possibilité d'effectuer des traitements en temps réel, alors que les traitements sur des photographies s'effectuent en général de manière différée, après le vol.

Traitement du signal vidéo

A l'heure actuelle, il existe de nombreux algorithmes d'analyse d'image pouvant être appliqués en temps réel sur un signal vidéo. Ces traitements visent, pour la plupart, à extraire une information utile de l'image, comme la présence ou non d'un élément d'intérêt dans le champ de la caméra. On trouve notamment la fonction 'détection de visage' sur certains drones destinés au grand public. L'avènement des caméras intelligentes rend possible toute une série de processus d'automatisation pour le professionnel de la construction. La figure 22A illustre, à titre d'exemple, l'identification et l'annotation automatique de certaines pathologies. La figure 22B montre un algorithme de détection de présence humaine, qui pourrait être utile pour la surveillance des chantiers.

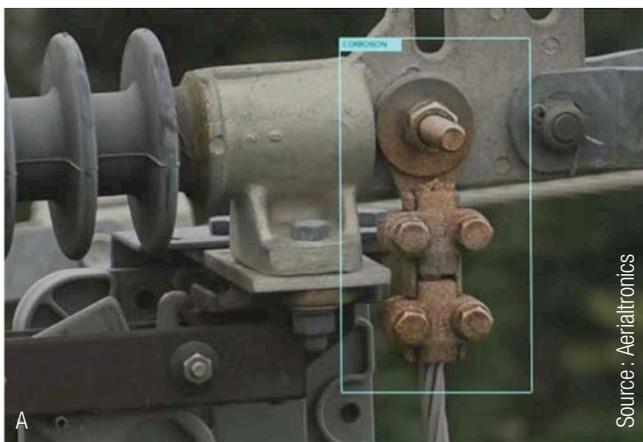


Fig. 22 Analyse d'une vidéo en temps réel qui permet l'identification automatique d'objets. A. Détection de la corrosion sur des objets métalliques. B. Détection de personnes et floutage automatique.

3. Anatomie d'un multicoptère électrique et de ses équipements

Traitement des images *a posteriori*

En plus des algorithmes dédiés au traitement en temps réel, il existe toute une gamme d'outils pour le **traitement de photos et de vidéos après le vol**. On peut s'en servir afin d'améliorer la qualité générale des images, en modifiant, par exemple, la luminosité ou le contraste. Il est également possible de préparer les images en vue d'une reconstruction photogrammétrique ultérieure, en corrigeant entre autres les distorsions créées par un objectif grand-angle. D'autres traitements encore permettent d'accentuer ou d'atténuer certains éléments de la photographie (voir figure 23) ou d'en extraire des parties spécifiques. L'analyse d'image est une discipline très large, aux multiples possibilités.



Fig. 23 Traitement numérique appliqué à une photographie de façade afin de mettre en évidence les joints de la maçonnerie.

3.2.4 AUTRES ÉQUIPEMENTS ET CAPTEURS SPÉCIFIQUES

Bien que la plupart des missions soient basées sur l'utilisation de capteurs optiques destinés à produire des images, le drone peut embarquer bien d'autres dispositifs. Il peut s'agir de détecteurs physiques (mesure de niveau sonore, par exemple), chimiques (mesure de composés organiques volatils, mesure de la radioactivité, suivi météorologique, par exemple) ou encore biologiques (voir figure 24). **L'intérêt d'associer de tels capteurs au drone est d'étendre la mesure à de nouvelles zones ou simplement de réduire les coûts par rapport aux solutions aériennes traditionnelles.** Bien souvent, la mise en opération d'un drone nécessite d'ailleurs une logistique nettement moins lourde que celle des avions ou des hélicoptères. De petits quadricoptères peuvent ainsi effectuer des sondages dans des endroits où la mesure aurait été impossible, irréaliste ou dangereuse auparavant (complexes souterrains, sites industriels pollués, etc.).

Outre le capteur principal embarqué, le drone peut être muni **d'accessoires lui permettant de garantir des mesures optimales, de s'adapter à des conditions de vol inhabituelles ou même d'interagir physiquement avec les objets qui l'entourent.** On trouve d'abord **des appendices d'aide à la mesure** : il s'agit de capteurs ou de dispositifs permettant à l'opérateur d'optimiser la mesure à réaliser. Un radar fixé sur l'aéronef permettra, par exemple, de fournir une information sur la distance par rapport aux obstacles ou aux objets filmés. Ce renseignement peut s'avérer crucial afin d'augmenter la précision des relevés. Un dispositif d'éclairage fixé au drone pour réaliser une inspection de nuit est un autre exemple d'accessoire (voir figure 25).



Fig. 24 Drone équipé d'un 'sniffer' pour le monitoring environnemental.

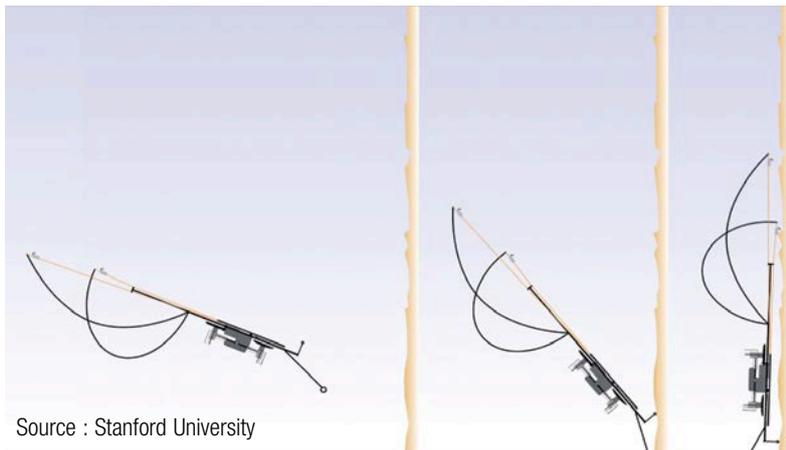


Fig. 25 Eclairage de grande puissance facilitant l'inspection de nuit.

3. Anatomie d'un multicoptère électrique et de ses équipements

Des **appendices de mouvement** offrent au drone la capacité de se déplacer temporairement sur une surface solide ou sur l'eau. L'université de Stanford a notamment développé un dispositif d'accroche grâce auquel le drone peut se déplacer à la verticale sur un mur (voir figure 26).

Les **appendices de sécurité** sont des éléments conçus pour manœuvrer un drone en réduisant autant que possible les risques de dommages matériels ou humains. Les boucliers pour hélices en constituent l'exemple le plus courant. Dans sa forme extrême, ce bouclier peut même couvrir l'entièreté du drone pour former une sphère protectrice (voir figure 27). En France, les drones de plus de 2 kg utilisés en zone habitée doivent être équipés d'un parachute d'urgence, autre exemple d'équipement additionnel de sécurité.



Source : Stanford University

Fig. 26 Drone mis au point pour escalader des parois verticales.



Source : Flyability

Fig. 27 Sphère de protection permettant au drone de se mouvoir dans des espaces confinés.

3.3 EQUIPEMENTS AU SOL

3.3.1 TÉLÉCOMMANDE

La plupart des drones sont contrôlés au moyen d'une télécommande ⁽⁸⁾ (ou radiocommande) dite 'à six canaux', identique à celles utilisées dans le milieu du modélisme. La configuration de base comporte deux manches de contrôle ⁽⁹⁾ à deux axes qui peuvent être contrôlés avec les pouces. Il s'agit des éléments strictement nécessaires au contrôle des mouvements du drone. La radiocommande peut également disposer d'un certain nombre de boutons ou de commutateurs sur la face du dessus, et d'un écran LCD utile pour la programmation de l'émetteur (liaison du drone avec la télécommande, par exemple) ou pour l'affichage de certains paramètres de vol (téléométrie, voir § 3.1.3, p. 18). Le nombre de boutons, de commutateurs ou de curseurs varie selon le modèle de commande.

Un des paramètres essentiels à prendre en compte lors de la sélection d'une télécommande est son mode de fonctionnement; à savoir la façon dont les mouvements du drone sont affectés à chaque manche de contrôle. Dans la configuration adoptée par la majorité des télépilotes (le mode 2), le manche gauche contrôle l'élévation et le lacet, tandis que le manche droit contrôle les mouvements horizontaux de roulis et de tangage (voir figure 28). La personnalisation des commandes offre toutefois une large liberté.

Les télécommandes modernes utilisent, pour la plupart, une fréquence de communication de 2,4 GHz. Sur cette fréquence, la puissance d'émission doit impérativement être limitée à 100 mW, sous peine d'amendes pour les contrevenants. A une telle puissance, la portée de communication peut dépasser le kilomètre [E1]. Puisque la réglementation belge impose le vol à vue, cette fréquence s'avère nettement suffisante pour la plupart des missions.

⁽⁸⁾ Ou 'transmitter' en anglais.

⁽⁹⁾ Parfois simplement appelés 'sticks'.

3. Anatomie d'un multicoptère électrique et de ses équipements

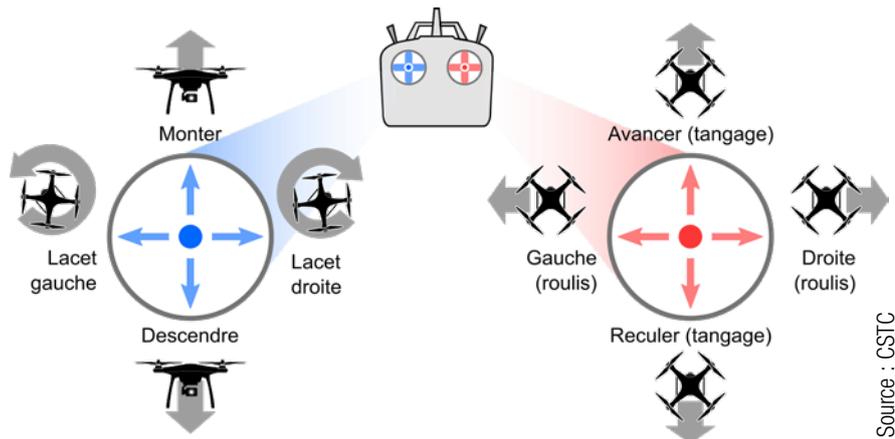


Fig. 28 Radiocommande utilisée pour le pilotage avec l'affectation la plus commune des commandes, le 'mode 2'.

3.3.2 RETOUR VIDÉO

Lors d'une mission, il se révèle souvent très utile pour le télépilote d'avoir un **retour vidéo** de la caméra embarquée, c'est-à-dire de **recevoir les images en temps réel sur un écran de contrôle** (voir figure 29). Cela permet, d'une part, de s'assurer du bon déroulement du vol depuis un point de vue rapproché des obstacles potentiels et, d'autre part, de cadrer au mieux les éléments à photographier ou à filmer. **La qualité des transmetteurs et des récepteurs vidéo est très variable** et l'investissement consenti par l'exploitant du drone dépendra de la nécessité éventuelle de disposer en direct d'une très bonne qualité d'image. Une mission d'inspection impliquant une prise de décision rapide justifierait, par exemple, un tel investissement.

Pour les missions centrées sur la prise de vue, **il peut s'avérer intéressant de faire appel à un cadreur qui pourra se concentrer spécifiquement sur la prise de vue**. A distance, il pourra, par exemple, régler les mouvements de la nacelle ou encore zoomer sur le sujet d'intérêt. Le télépilote se concentrera alors, quant à lui, sur les mouvements du drone. Une bonne coordination entre les deux acteurs est essentielle. De tels systèmes dits 'à double commande' sont néanmoins réservés aux drones les plus professionnels. Une autre possibilité pour optimiser la prise d'images consiste à préprogrammer le vol du drone. **Le télépilote doit néanmoins pouvoir reprendre le contrôle du drone à tout instant, et ne jamais le perdre de vue**.



Fig. 29 Radiocommande avec écran de retour pour optimiser la prise de vue.

3.4 TÉLÉPILOTAGE ET AUTOMATISATION DU VOL

Les drones peuvent être manœuvrés d'une multitude de façons différentes, allant du télépilotage manuel au vol entièrement autonome. On parle de système complètement autonome seulement lorsque le drone est capable d'adapter son vol de manière continue, en fonction de la mission qui lui est confiée et de données de positionnement récoltées en temps réel. Si de tels systèmes sont encore rares, de nombreux drones disposent de niveaux intermédiaires d'automatisation. Qu'il soit manuel, automatisé ou tout à fait autonome, le pilotage suit toujours le schéma suivant :

1. la situation (position, direction, vitesse) actuelle du drone est analysée
2. des ordres sont donnés aux organes moteurs du drone en fonction de la modification de position ou de mouvement désirée
3. les ordres résultent en une modification du mouvement/de la position du drone dans l'air
4. la concordance entre le mouvement/la position réel(le) et le mouvement/la position souhaité(e) est analysée
5. les ordres sont modifiés en conséquence.

Le premier type de pilotage est le **pilotage entièrement manuel** en ligne de vue (VLOS – *Visual Line of Sight*). Dans ce cas, le télépilote donne les ordres en continu au drone au moyen de la télécommande et garde le drone visible en permanence. En observant les mouvements de l'appareil, le télépilote ajuste en continu la pression sur les manches directionnels, afin de respecter le plan de vol qu'il s'impose mentalement. Aucune aide ne vient ici épauler le télépilote, et maintenir le drone stable demande une capacité d'adaptation permanente, surtout en présence de vent. Maintenir le drone à une position fixe dans l'air demande de solides compétences de pilotage. Une variante du télépilotage à vue consiste à manœuvrer le drone sur la base du retour de la caméra en temps réel. Il s'agit du pilotage dit '*First Person View*' (FPV), très populaire dans les disciplines acrobatiques.

On trouve ensuite une variété de modes de vol dits 'intelligents'. Parmi ceux-ci, la première catégorie est l'**assistance automatique**. Ces fonctions visent à assister le télépilote, qui garde le contrôle des mouvements principaux de l'appareil. La fonction la plus répandue est le maintien d'altitude (repris souvent sous le terme 'mode ATTI') : aidé par son altimètre, et en l'absence d'ordre de mouvement vertical de la part du télépilote, le drone ajuste constamment le régime de ses rotors afin de maintenir une altitude constante. Ce dispositif évite de devoir effectuer des microcorrections permanentes pour garder le drone à niveau. Le maintien de la position par GPS complète souvent le maintien d'altitude. Une autre fonction automatique de plus en plus répandue est l'évitement d'obstacles, lorsque le drone est muni de capteurs de proximité.

Parmi les formes d'automatisation plus poussées, on compte la **manœuvre automatique**. Dans ce cas, le drone effectue un type de manœuvre préprogrammée. Il peut s'agir, par exemple, de figures aériennes simples (cercles, allers-retours, ...). La manœuvre automatique la plus répandue est la fonction '*Return to Home*' (ou '*Auto Return Mode*') : en cas de perte de signal ou d'enclenchement d'un bouton par le télépilote, le drone retourne vers une position GPS spécifique, qui est définie auparavant par l'utilisateur et qui correspond généralement au point de décollage. La présence d'un système de positionnement GPS est d'ailleurs nécessaire à l'usage de la plupart de ces fonctions. Sans connaissance de sa position, le drone ne pourrait

3. Anatomie d'un multicoptère électrique et de ses équipements

corriger ses trajectoires en fonction du vent, par exemple. Le vol automatique consiste en une préprogrammation complète d'une séquence de vol au moyen de points de passage GPS (voir figure 30). Ce mode de vol s'avère extrêmement utile pour les professionnels, puisqu'il permet de couvrir une zone d'intérêt de manière optimale. On peut également programmer le déclenchement de l'appareil photo ou d'un autre équipement embarqué.

La **manœuvre autonome** ou le **vol autonome** vont un peu plus loin encore. Ces fonctions permettent de se substituer au télépilote pour la réalisation de manœuvres ou de séquences de vol qui demandent au drone de s'adapter en temps réel à une donnée externe complexe. La fonction '*Follow Me*' en constitue un bon exemple. Une fois la fonction activée, le drone suivra les déplacements d'une personne ou d'un objet défini ⁽¹⁰⁾ en utilisant des algorithmes de reconnaissance d'image. **Dans ce cas, les points de passage aériens ne sont pas connus à l'avance et le drone fait preuve d'une certaine capacité d'adaptation.**

Ces différentes catégories donnent un aperçu global des technologies disponibles. Dans la réalité, la distinction entre ces modes intelligents peut se révéler moins évidente.



Fig. 30 Programmation de vol par points de passage GPS.

⁽¹⁰⁾ Fonction utilisée pour filmer les disciplines sportives, par exemple.

4. DES MODÈLES 3D CRÉÉS PAR DRONE

4.1 INTRODUCTION

Les technologies de relevé géométrique ont fortement évolué ces dernières années. Elles permettent de numériser automatiquement des objets existants et d'en produire une représentation en très haute résolution (reproduction de détails fins et de couleurs, voir figure 31). Le travail de modélisation s'en trouve grandement simplifié; il n'est même parfois plus nécessaire.

On distingue deux grandes familles de techniques de relevé 3D en haute définition utilisables en combinaison avec un drone : les techniques de *scanning 3D* à proprement parler, où la géométrie d'un objet ou d'un bâtiment est mesurée en temps réel par des systèmes très performants comme les scanners laser, et les techniques de reconstruction photogrammétrique, consistant à déterminer la géométrie de l'objet à partir de photos grâce à un logiciel. Le lecteur intéressé trouvera un aperçu des évolutions récentes en la matière dans la monographie du CSTC intitulée 'Le relevé 3D à l'heure du BIM. Capturer la réalité en haute définition' [D2].



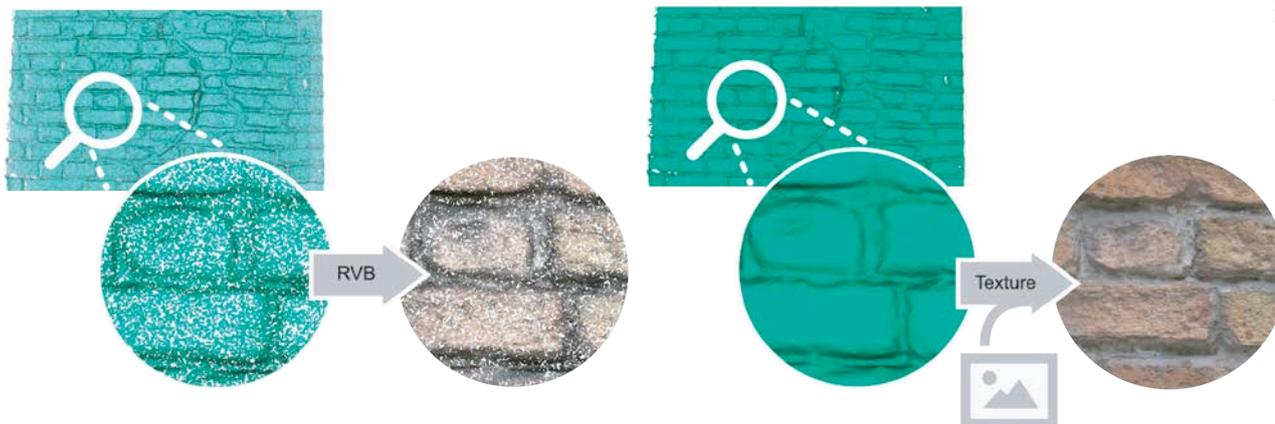
Source : CSTC

Fig. 31 Numérisation 3D réalisée par photogrammétrie.

Un nuage de points est un type de fichier fréquemment obtenu lorsque l'on fait appel à une méthode de relevé 3D à haute définition. Les objets scannés y sont reproduits sous la forme d'une multitude de points localisés dans l'espace et suffisamment rapprochés pour que l'on puisse distinguer des détails très fins. Un autre type courant de fichier 3D brut est le maillage triangulé ou *mesh*. L'objet y est représenté par un ensemble de faces triangulaires interconnectées. Au regard de la nature très différente de ces deux types de modèles, l'information de couleur y sera encodée de deux manières distinctes. Dans un nuage de points, une couleur (une valeur RVB) est attribuée à chaque point composant le modèle. Dans le cas d'un maillage, la surface de chaque face triangulaire doit être colorée; cette opération est réalisée au moyen d'une texture. La figure 32 montre les distinctions entre ces deux types courants de fichiers 3D bruts issus de relevés en haute définition.

Nuage de points

Maillage



Source : CSTC

Fig. 32 Les techniques de relevé géométrique à haute définition produisent des fichiers 3D bruts sous forme soit de nuages de points, soit de maillages.

4. Des modèles 3D créés par drone

Si les relevés géométriques s'effectuent encore le plus souvent depuis le sol, on imagine aisément les énormes potentialités qui s'offrent lorsque l'on scanne l'existant depuis les airs. Les paragraphes suivants décrivent comment les drones sont employés pour repousser encore plus loin les limites des technologies de numérisation 3D à haute définition.

4.2 TECHNOLOGIES DE NUMÉRISATION 3D UTILISABLES AVEC UN DRONE

4.2.1 RECONSTRUCTION 3D PAR CORRÉLATION D'IMAGES

Principe

Avec la méthode de reconstruction 3D par corrélation multi-image ⁽¹⁾, un logiciel reconstruit un objet réaliste en trois dimensions au départ de photographies de ce dernier sous différents angles de vue (voir figure 33). Il s'agit d'une méthode moderne de photogrammétrie, rendue possible par l'augmentation de la puissance de calcul des ordinateurs. Rappelons que le principe de ce type d'algorithme consiste à identifier des points homologues entre les différentes images afin de 'comprendre' comment l'objet photographié occupe l'espace ⁽²⁾.

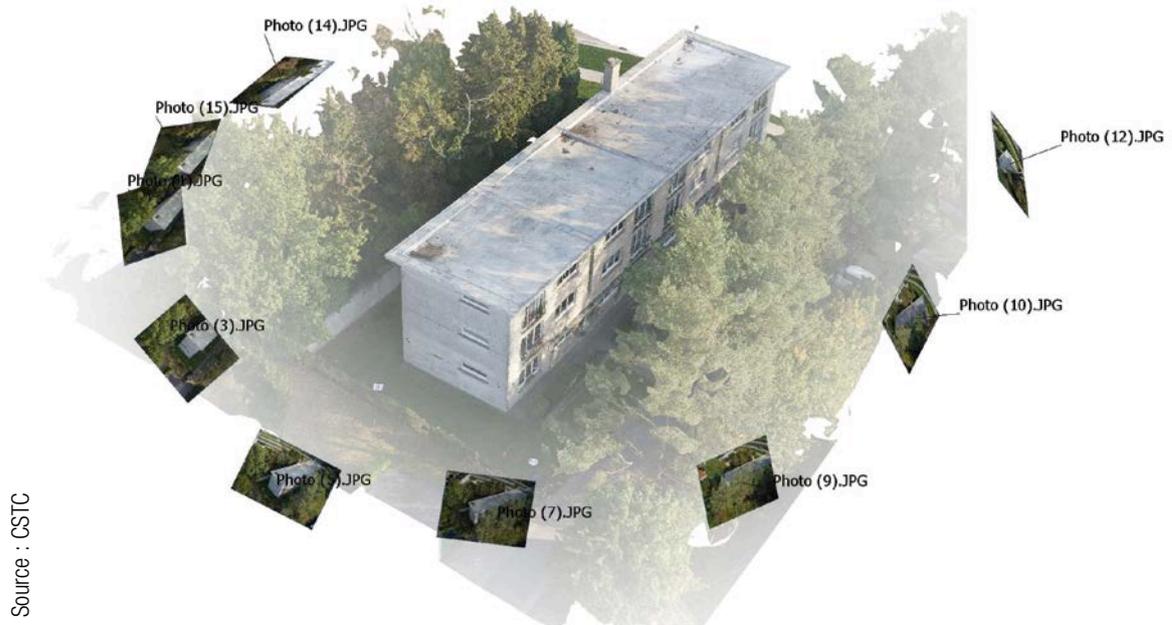


Fig. 33 Principe de la photogrammétrie par drone.

Les images successives de l'objet doivent donc montrer une similitude suffisante pour que l'algorithme puisse trouver des points homologues. En d'autres termes, le déplacement de l'appareil photo entre chaque déclenchement doit être minimal. En pratique, on importe l'ensemble des clichés dans un logiciel dédié qui, après une phase de calcul, produit un modèle 3D dont la fidélité dépend du nombre et de la qualité des photos. Cette technique est largement répandue dans le domaine de la cartographie aérienne traditionnelle (par avion), où des modèles de terrains sont réalisés à partir de photographies prises à la verticale ou légèrement en oblique par rapport à la verticale. Le drone ne fait qu'en étendre les possibilités, grâce à ses capacités de vol stationnaire et de manœuvre précise de la nacelle photographique.

⁽¹⁾ On parle parfois simplement de 'photogrammétrie 3D'.

⁽²⁾ Une description détaillée de cette méthode et de ces principes figure dans la [monographie du CSTC \[D2\]](#).

Utilisation des drones

L'avènement des drones capables d'embarquer une caméra stabilisée et d'effectuer un vol stationnaire a permis de diversifier les angles de vue et donc d'étendre la portée de la photogrammétrie 3D, afin de produire facilement des modèles 3D de bâtiments entiers, par exemple. Les drones comblent, en quelque sorte, le vide entre la reconstruction 3D à partir de photos prises au sol et la photogrammétrie aérienne traditionnelle. Les multiples points de vue possibles depuis les airs garantissent la complétude des modèles générés, là où on pouvait observer des 'trous' dans les nuages de points reconstruits uniquement à partir d'images prises du sol (voir figure 34). Notons que la méthode est parfois reprise sous l'appellation plus simple de 'photogrammétrie par drone'.

Vient ensuite la question des méthodes de prise de vue avec un drone. Grâce aux nacelles orientables à distance (voir § 3.2.1, p. 19), de très nombreux angles de vue peuvent être choisis pour photographier un bâtiment (voir figure 35). En photographie aérienne, la prise de vue verticale, aussi appelée 'NADIR', est la plus typique. Elle est entre autres fortement utilisée en topographie et en cartographie. Si de tels angles de vue sont en général suffisants pour créer des modèles de terrains, ils s'avèrent inappropriés pour reconstruire adéquatement des éléments verticaux tels que des façades de bâtiments. Le secret d'un travail de qualité en termes de reconstruction photogrammétrique réside donc dans une combinaison adéquate des prises de vue verticales, obliques et horizontales (voir figure 36). L'objectif étant d'optimiser la retranscription des éléments dans toutes les dimensions, tout en permettant au logiciel de reconstruction d'identifier les similitudes entre les différentes images.



Fig. 34 Inconvénient de la photogrammétrie à partir d'images prises au sol : les zones non visibles sur les photos (toitures, balcons, par exemple) donnent des 'trous' dans les modèles 3D reconstruits.

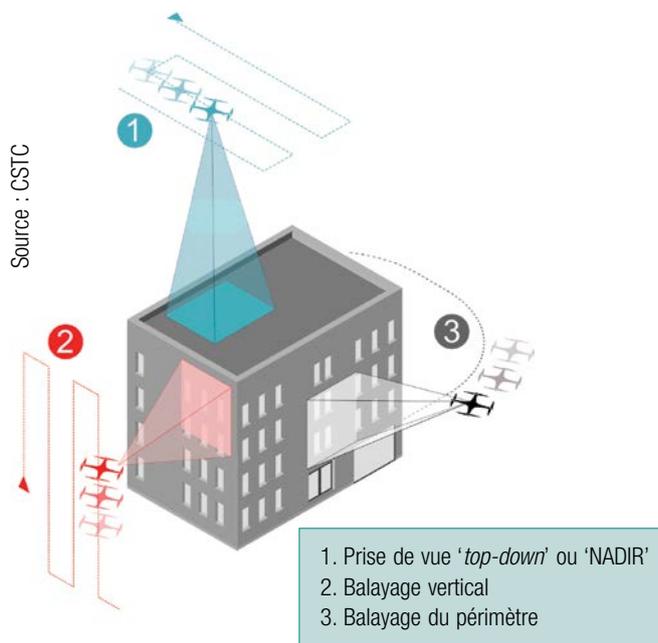


Fig. 35 Les méthodes suivies pour prendre les photographies par drone influencent la qualité du modèle obtenu.



Fig. 36 Deux reconstructions 3D très différentes selon le protocole de prise de vue suivi. A. Uniquement des photographies NADIR. B. Combinaison de photographies NADIR et de photographies obliques.

4. Des modèles 3D créés par drone

Logiciels

Si l'on souhaite utiliser la méthode de reconstruction photogrammétrique par corrélation d'images, il convient de bien choisir **les logiciels et de comprendre leur paramétrage**. De nombreux logiciels existent et il n'est pas toujours facile de déterminer la solution la plus adéquate pour l'utilisateur désireux de s'initier à la photogrammétrie par drone.

Parmi les logiciels disponibles, **on peut d'abord séparer les solutions spécifiquement dédiées à l'usage des drones de celles plus généralistes**. Ainsi, certains logiciels offrent une série d'outils d'aide à la prise de vue aérienne et permettent même à l'utilisateur de préprogrammer un vol. Dans certains cas, les possibilités en matière d'automatisation de la prise de vue sont très avancées. Les bâtiments à numériser peuvent, par exemple, être dessinés de manière sommaire en 3D sur une carte, et le logiciel proposera alors un plan de vol adéquat selon le recouvrement souhaité entre images (voir figure 37).

On peut aussi **distinguer les logiciels avec lesquels le calcul de reconstruction 3D s'effectue localement sur l'ordinateur de l'utilisateur, d'une part, et les solutions proposant du cloud computing, d'autre part**. Cette dernière méthode consiste à opérer les calculs sur un serveur externe, appartenant le plus souvent à la société qui édite le logiciel, avant d'envoyer le modèle 3D finalisé à l'utilisateur. Bien que cette technique apporte un gain notable en termes de temps de calcul, on perdra parfois en contrôle sur la manière dont le modèle est généré. C'est particulièrement le cas pour les logiciels destinés au grand public.

La plupart des logiciels disponibles ont un prix d'acquisition élevé ou requièrent un abonnement mensuel, même s'il existe certains outils gratuits ou *open source*. **C'est pourquoi la qualité de la reconstruction 3D offerte ainsi que les fonctions proposées devront être analysées, afin de définir la solution la plus économiquement viable pour l'exploitant du drone**.



Source : Drone Harmony

Fig. 37 Traitement avancé de l'automatisation de la prise de vue.

Référencement spatial des mesures

Chaque modèle 3D créé par photogrammétrie doit être orienté, positionné et mis à l'échelle [D2], car une photographie ne contient pas en elle-même d'information sur la taille des objets photographiés. Lorsque les photographies sont prises depuis le sol, la stratégie classique consiste à s'appuyer sur **des points de référence ou points de contrôle au sol (GCP pour 'Ground Control Points')**. Les coordonnées réelles de ces points, matérialisés sur chantier par des cibles accolées à différents endroits clés, sont alors relevées à l'aide d'une station totale. On encode ensuite les coordonnées mesurées dans le logiciel de

reconstruction photogrammétrique, et on indique la position des cibles sur les différentes photographies. Cette dernière étape s'opère parfois automatiquement, si les cibles sont pourvues d'un motif que le logiciel peut reconnaître.

En photogrammétrie 3D par drone, on dispose d'une information précieuse : la position du drone à chaque moment où une photo a été prise. En effet, tous les drones professionnels sont équipés d'un système GPS. **Si l'on couple le déclenchement de l'appareil photo à la mesure GPS, les images prises peuvent donc être 'géotaguées'**. Chaque fichier image est alors associé à des coordonnées géographiques, lesquelles peuvent être utilisées par le logiciel pour orienter le modèle. Toutefois, **les capteurs GPS typiquement embarqués sur les drones n'offrent qu'une précision de l'ordre du mètre**.

Il existe deux solutions en vue d'augmenter la qualité de l'orientation, ou de valider la justesse du fichier 3D généré par photogrammétrie. La première est de se rabattre sur la méthode de référencement traditionnelle : l'opérateur du drone peut employer des cibles posées à l'horizontale (au sol, sur des toitures plates, etc.) et/ou à la verticale (sur les façades, les murs, selon le type de mission), dont il faut relever la localisation avec précision (voir figure 38A). **Une solution alternative consiste à équiper le drone d'un système électronique améliorant le positionnement fourni par le GPS embarqué**. Il peut s'agir d'un **module RTK (Real Time Kinematic)**, qui permet de profiter du signal d'une station de référence pour atteindre une précision de positionnement de l'ordre du centimètre. La technologie **PPK (Post-Processed Kinematic)** est très semblable, mais plus flexible. Elle permet une correction *a posteriori* des données de localisation. Le principal désavantage de ces systèmes est leur coût. En outre, il peut s'avérer difficile d'intégrer un système RTK ou PPK dans un drone qui n'a pas été prévu à cet effet.

Bien que l'utilisation de cibles soit la solution préconisée dans la plupart des cas, elle peut parfois se révéler insatisfaisante. Ainsi, lorsque l'on relève un chantier en cours à intervalles de temps réguliers et que les cibles risquent d'être déplacées ou altérées entre deux relevés successifs (arrachement involontaire, détérioration due à la saleté et à la poussière, etc.), il faudra remesurer l'entièreté des cibles à chaque occurrence du relevé photogrammétrique. Ces mesures supplémentaires représentent un coût quelquefois très élevé. L'opérateur aura alors intérêt à se tourner vers un système RTK/PPK ou vers des cibles de contrôle intelligentes (voir figure 38B) intégrant un dispositif de géolocalisation interne.

Le relevé 3D par drone devient dès lors une discipline complexe si l'on veut augmenter la précision de la mesure. En réalité, le prestataire désigné pour la réalisation d'une mission nécessitant une haute précision de mesure devrait avoir des connaissances en matière de topographie, ou du moins faire appel à un géomètre.



Fig. 38 Référencement spatial des relevés. A. Collecte manuelle de points GPS. B. Une cible intelligente.

4. Des modèles 3D créés par drone

4.2.2 SCANNER LASER AÉROPORTÉ

L'utilité du scanner laser sur chantier ne fait aujourd'hui plus aucun doute. Cependant, soulever un tel équipement dans les airs et générer des données précises constitue un réel défi. Tout d'abord, **il s'agit d'appareils très lourds et coûteux**. Il convient donc de choisir un drone capable d'assurer le transport sécurisé du scanner, et ce, afin de protéger à la fois les personnes survolées et l'équipement embarqué. Même si le drone est capable de soulever le scanner dans les airs, encore doit-il disposer d'une autonomie de vol suffisante pour mener à bien la mission. Un autre problème de taille concerne directement la mesure. **Les scanners laser terrestres sont en effet conçus pour rester fixes pendant toute la durée du scan, soit durant 5 à 30 minutes en moyenne**. Il est bien entendu impossible de maintenir un drone parfaitement stable dans les airs, et il s'avère donc nécessaire de corriger la mesure en fonction des mouvements du drone. Certains chercheurs et entreprises se sont lancés dans la conception de scanners laser aéroportés (voir figure 39). Le principe est de **corriger les mesures 3D sur la base de l'estimation très précise de la position et des mouvements de l'appareil** (voir figure 40). Grâce à un tel appareil, aucune cible ne doit donc être apposée sur le site ou sur le bâtiment d'intérêt afin d'orienter le modèle. Cela représente un grand avantage pour l'opérateur, en particulier dans le cas de sites complexes ou dangereux.



Fig. 39 Drone belge qui permet au scanner laser de prendre les airs.



Fig. 40 L'utilisation d'un scanner laser monté sur un objet en mouvement impose de corriger les mesures. A. Résultat du relevé par scanner laser aéroporté sans correction. B. Même scan après correction.

4.2.3 LOCALISATION ET CARTOGRAPHIE SIMULTANÉES SANS GPS

A l'aide des véritables technologies de scan 3D ⁽¹³⁾, le drone peut reconstruire les obstacles aux alentours de manière continue. A partir de là, les chercheurs ont tenté de développer des algorithmes permettant au drone d'estimer sa propre position uniquement à partir des mesures 3D réalisées, donc sans l'assistance d'un système de positionnement GPS. Il s'agit d'une **approche de localisation et de cartographie simultanées, aussi connue sous l'acronyme SLAM (Simultaneous Localization**

⁽¹³⁾ Outre le scanner laser, on peut citer la caméra de profondeur, que l'on retrouve, par exemple, dans le système Kinect de Microsoft. Parmi ces technologies, on trouve aussi les scanners à ligne laser, les scanners à lumière structurée ou encore de simples caméras dont le flux vidéo est analysé en temps réel et reconstruit en 3D par photogrammétrie.

and Mapping). Grâce à l'approche SLAM, les technologies de scan 3D peuvent dès lors être mises à profit en vue d'orienter le drone dans un espace *a priori* inconnu. Ces solutions aboutissent à la mise au point d'un drone autonome capable de voler dans des environnements où le signal GPS est faible, voire inexistant (espaces intérieurs ou espaces souterrains, par exemple; voir figure 41). Notons qu'en pratique, il s'avère parfois nécessaire de prévoir de nombreux capteurs complémentaires pour que le drone puisse effectuer un déplacement autonome (comme des accéléromètres, des distancemètres, des caméras additionnelles, etc.).

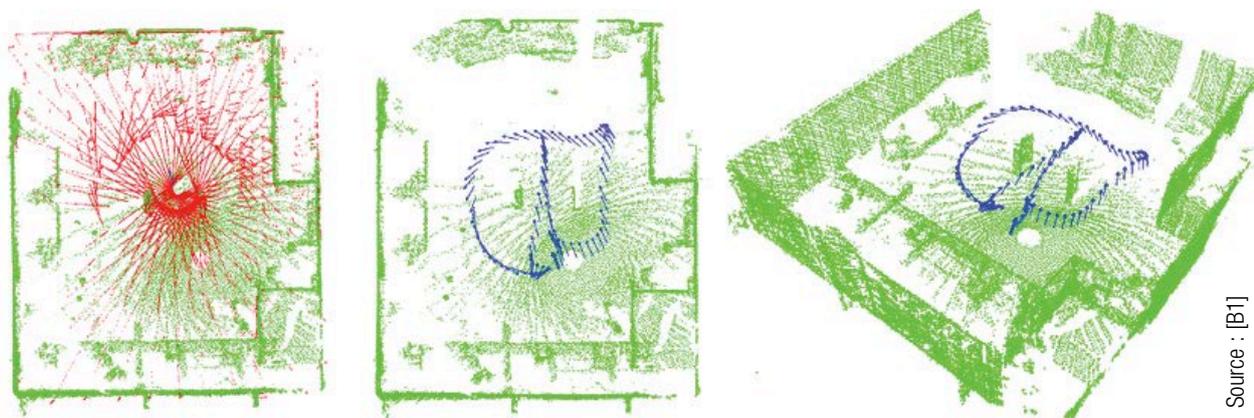


Fig. 41 Les algorithmes SLAM permettent une cartographie des espaces intérieurs sans GPS.

4.3 ECHELLE DES OBJETS ÉTUDIÉS ET UTILISATIONS DES MODÈLES 3D

Toute mission de relevé 3D par drone comporte **trois étapes majeures** (voir figure 42). On commence par la phase de collecte des données en elle-même, qui fournira des données brutes (nuages de points, photographies, etc.). Les données brutes doivent ensuite être mises en forme, afin de pouvoir être utilisées par le commanditaire. Cette transformation des données peut être plus ou moins complexe selon l'application envisagée et aboutira à un livrable utile, à savoir un modèle ou un fichier directement ou facilement exploitable. Un fabricant de châssis aura, par exemple, besoin d'un dessin 2D des baies existantes, et pas du nuage de points complet. La valeur ajoutée des prestataires sur le marché du relevé 3D réside donc dans leur capacité à capturer et à transformer les données de manière adéquate pour répondre à un besoin spécifique. Ainsi, un télépilote de drone se démarquera davantage par ses compétences en matière de récolte de données que par ses compétences de pilotage à strictement parler.

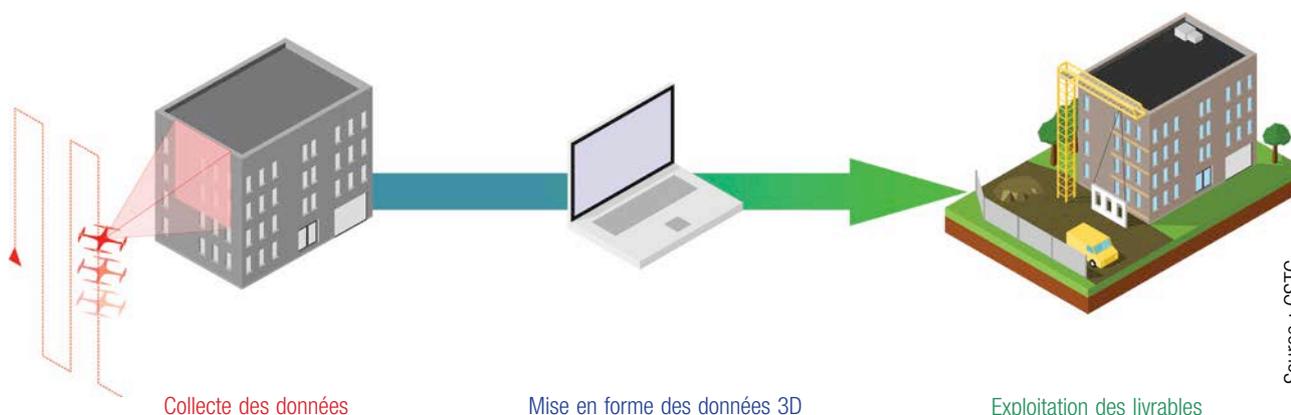


Fig. 42 Les trois phases d'un relevé et le cheminement de l'information.

4. Des modèles 3D créés par drone

L'opérateur chargé du relevé doit, dans l'idéal, toujours garder à l'esprit les objectifs fins d'utilisation. Il incombe donc aussi au commanditaire d'exprimer ses besoins de manière claire auprès de l'exploitant du drone et ses responsables de mise en forme des données. Voici quelques exemples de questions qu'il est utile de se poser :

- **Quel est l'objet d'étude ? Où s'arrête-t-il exactement ?**
Il n'est pas nécessaire de scanner les quatre façades d'un bâtiment si seule une façade intéresse le commanditaire.
- **Quelle information est nécessaire ? Quelle information est souhaitable ?**
Cela revient à poser la question du format du livrable : le type de modèle attendu, le format du fichier, l'éventuelle répétition de la mesure dans le temps, les modalités de stockage et de transmission des données, etc.
- **Quel est l'écart de mesure acceptable (tolérance) pour l'utilisation finale envisagée ?**
Un modèle 3D destiné à une application de réalité virtuelle ne sera pas soumis aux mêmes prérequis qu'un modèle destiné à la fabrication d'une pièce en usine.

Il arrive que le commanditaire n'ait pas une bonne connaissance des possibilités d'un relevé 3D. Dans certains cas, ses attentes seront simplement irréalistes. À l'inverse, tous les prestataires ne seront pas aptes à produire les livrables attendus, ou à les produire avec le niveau de précision requis.

Rappelons qu'une représentation 3D numérique est par nature hautement transformable. On peut ainsi transformer un modèle 3D d'un type à un autre, réduire sa taille, le comparer à un autre modèle ou à des données de référence, ou encore s'en servir comme support pour dessiner, mesurer ou calculer. S'il est impossible de dresser l'inventaire des possibilités qui s'offrent aux professionnels en termes de livrables, tant elles sont étendues, on tentera néanmoins de **donner, dans le présent document, un aperçu de quelques sujets d'étude fréquents en numérisation 3D par drone et des types de traitements numériques associés**. Pour de plus amples informations concernant les chaînes de traitement des modèles 3D, on consultera la **monographie du CSTC consacrée au relevé 3D en haute définition** [D2].

A petite échelle, on peut numériser des éléments architecturaux de petite ou très petite taille, tels que des ornements, des moulures ou des éléments sculptés situés en hauteur (voir figure 43). Si ces objets d'étude sont constitués d'un matériau pierreux, la photogrammétrie se révélera en général très efficace. **A partir du fichier obtenu, on peut notamment fabriquer une réplique de cet objet au moyen de techniques de fabrication numérique (impression 3D ou défonçage à commande numérique, par exemple)**. On se base alors sur un maillage qui est traduit en ordres pour la machine par le biais d'un logiciel spécialisé. L'information de couleur collectée n'a aucune importance dans ce cas. A l'inverse, un maillage bien texturé constitue une aide précieuse pour les experts et les restaurateurs, en vue d'identifier des pathologies, par exemple. L'information à mettre en évidence n'est donc pas la même d'une étude à l'autre.



Fig. 43 Numérisation 3D d'un élément architectural.

Source : CSTC

A plus grande échelle, les drones peuvent être utilisés pour créer des modèles liés au bâtiment entier. Les livrables à cette échelle incluent des nuages de points, des orthophotos⁽¹⁴⁾, des dessins ou modélisations CAO, ou encore des modèles BIM. Dans certains cas, l'opérateur du drone devra se focaliser sur une partie précise du bâtiment, comme une façade ou la toiture. Là aussi, les possibilités offertes par la numérisation 3D aux différents corps de métier se révèlent immenses. Un **modèle numérique de planéité d'une façade** existante peut, par exemple, être utile à un entrepreneur chargé de sa rénovation (voir figure 44).

⁽¹⁴⁾ Aussi parfois appelées 'orthophotoplans' ou 'orthomosaïques'. Il s'agit de photographies corrigées dans lesquelles on a enlevé tout effet de perspective; dans les logiciels de photogrammétrie, il est souvent possible de les générer automatiquement à partir du maillage 3D reconstruit et des photos utilisées pour la reconstruction.

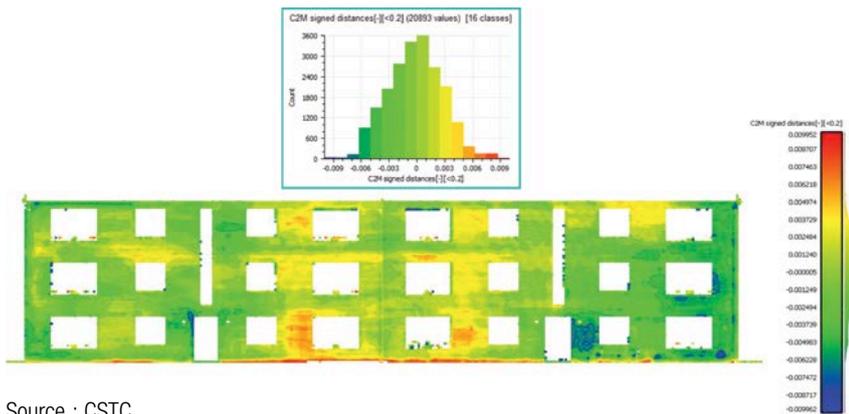


Fig. 44 Modèle numérique de déformation d'une façade. Chaque point du nuage est coloré selon sa distance par rapport à un plan moyen. Les zones colorées en bleu ou en rouge s'écartent fortement de ce plan.

Source : CSTC

A très large échelle, les drones représentent **des outils très puissants pour la modélisation de terrains, de larges infrastructures ou même de quartiers entiers**. De nombreuses données peuvent être extraites des maillages créés par photogrammétrie (voir figure 45A) : courbes de niveau, surfaces, volumes, etc. Il est également possible de se servir du scan 3D pour générer des orthophotoplans (voir figure 45B) ou comme support pour produire des dessins topographiques.

Les **modèles numériques de surface (DSM pour 'Digital Surface Model')** sont des cartes tridimensionnelles indiquant l'élévation du terrain et des éléments présents sur le sol (bâtiments, végétation, routes, etc. – voir figure 45C). En phase de conception, on peut **importer le scan d'un site pour y implanter la maquette BIM d'un bâtiment à construire**. Ce scan peut aussi être employé comme base afin de redéfinir un vol automatique en prenant en compte le relief. Un premier vol pourrait ainsi servir de point de départ en vue d'effectuer un relevé 3D plus précis dans un second temps.

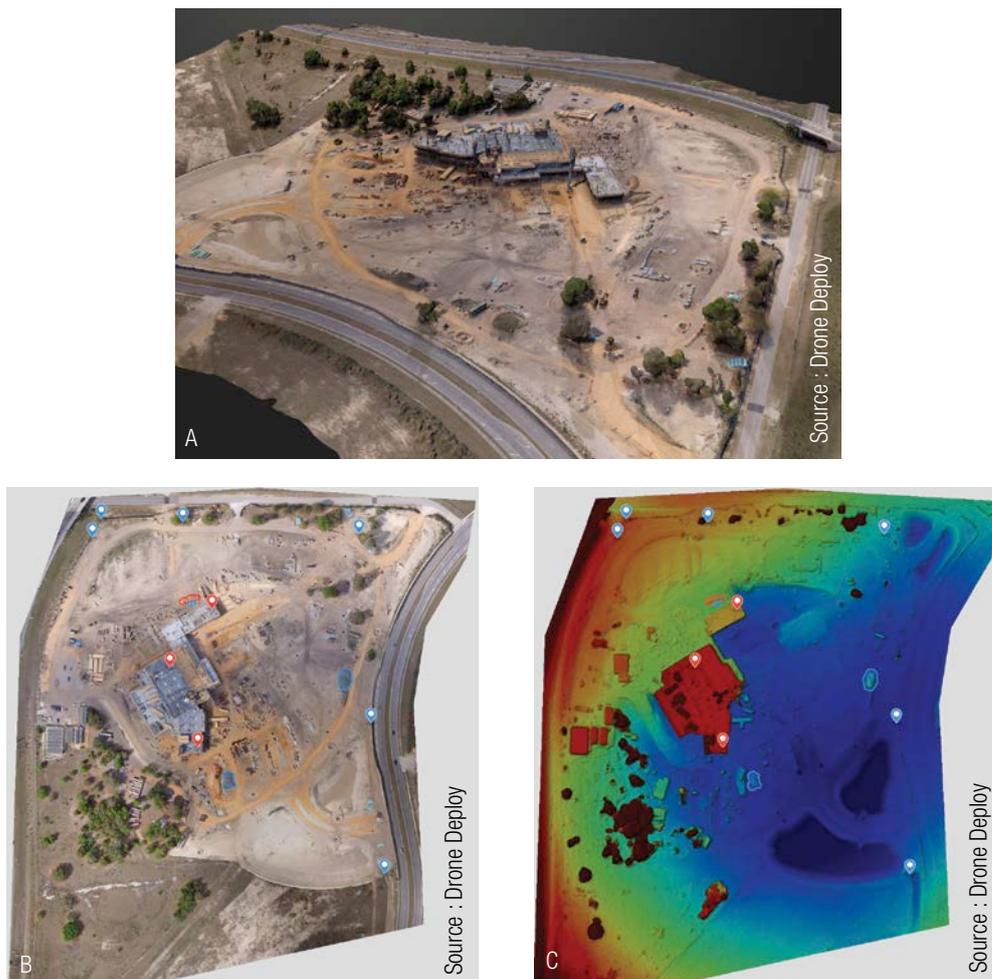


Fig. 45 Livrables utiles à large échelle. A. Maillage texturé. B. Orthophotographie. C. Modèle numérique de surface.

5. ANALYSE DES OPPORTUNITÉS POUR LE SECTEUR DE LA CONSTRUCTION

5.1 INTRODUCTION

Les drones offrent de nombreuses opportunités aux professionnels de la construction. Ils permettent d'obtenir à moindre coût des données aériennes qu'il était difficile, voire impossible, d'obtenir auparavant. **En prenant de la distance par les airs, on pose un regard nouveau sur les bâtiments et les chantiers.**

Le premier bénéfice immédiat se trouve donc dans la capacité à capturer rapidement l'existant depuis les airs, sous forme de photographies ou de vidéos. Cela permet, par exemple, au client ou à l'entrepreneur de se familiariser très vite avec un site ou un bâtiment. En plus des images aériennes, de nombreux outils peuvent être embarqués et utilisés comme jamais auparavant (voir § 3.2, p. 19).

Globalement, on peut dire des drones qu'ils :

- **offrent un service inédit, en permettant notamment de :**
 - collecter une grande quantité de photographies ou de données 3D aériennes en temps réel
 - créer des rendus 3D de sites entiers avec précision
 - effectuer des monitorings environnementaux dans les airs
- **permettent de réaliser des tâches existantes plus rapidement et à moindre coût, comme :**
 - effectuer des relevés 3D à la demande, y compris des zones en hauteur
 - réaliser des inspections diverses (visuelles, thermographies, etc.) de manière répétée et éventuellement automatisée
 - gérer les déplacements sur chantier
- **permettent de réduire certains risques en réalisant diverses tâches, entre autres :**
 - réaliser des inspections en hauteur sans nécessité d'installer des équipements tels que des échafaudages ou des cordes de rappel
 - effectuer des relevés sur des sites dangereux (contamination chimique, instabilités structurales, etc.)
 - surveiller des activités à risques en temps réel.

Une enquête réalisée en 2015 par Navigant [N1] a recensé des commentaires positifs venant des utilisateurs de drones dans la construction. Certains de ces commentaires sont repris dans l'encadré ci-dessous.

Concernant les données, leur qualité, et les coûts associés :

- 'Relevés de terrain précis [...].'
- 'Une perspective unique sur le projet, une meilleure profondeur des photos [...].'
- 'Beaucoup plus rapide que l'utilisation de la station totale [...].'
- 'Fournit aux clients distants un suivi des travaux en temps réel [...].'
- 'Des photos de meilleure qualité à un prix inférieur et plus rapide [...].'
- 'Les clients aiment voir leur projet de cet angle de vue [...].'
- 'Les images sont fantastiques du point de vue du marketing [...].'

Concernant les aspects managériaux :

- 'Le drone est bénéfique pour une compréhension complète de l'avancement du projet et des problèmes de conception dans les zones difficiles à observer [...].'
- 'Il nous aide, architecte du projet, à donner de meilleures résolutions aux conflits. Il fournit également un moyen de partage de l'information, car tous les membres de l'équipe de projet ne sont pas toujours disponibles pour visiter le site en personne [...].'
- 'L'inspection de dégâts dans des zones difficilement accessibles s'est avérée inestimable pour la planification des réparations [...].'

Concernant l'utilisation :

- 'Très efficace [...].'
- 'L'utilisation de points de passage et de plans de vol préprogrammés a de nombreuses utilisations. On peut, par exemple, suivre le même vol mois après mois, de quoi potentiellement remplacer les *'time lapse'* et les photographies aériennes.'

Concernant la sécurité :

- 'Les points de passage et les vols préprogrammés rendent l'expérience plus sûre qu'en vol manuel.'
- 'Davantage de sécurité sur les toitures compromises.'

5. Analyse des opportunités pour le secteur de la construction

5.2 UTILISATIONS ÉPROUVÉES DU DRONE

Cette section détaille plusieurs applications du drone qui sont déjà entièrement validées et dont les bénéfices pour la construction sont prouvés. Les domaines et les tâches concernés sont très vastes et sont résumés à la figure 46.



Fig. 46 Les différents domaines d'application du drone et les types courants d'études.

5.2.1 DOCUMENTATION ET COMMUNICATION

Cette première catégorie regroupe les missions dans lesquelles le drone est utilisé comme **producteur de médias (photographies, vidéos, modèles 3D photoréalistes, etc.)**, afin de mieux documenter la réalité et donc de mieux l'appréhender. Au début d'un projet de construction, par exemple, lorsque les architectes et les planificateurs élaborent leurs plans initiaux, les informations concernant le site sont cruciales. **Les drones offrent une solution précise et rapide pour obtenir un aperçu complet et minutieux du site.** Ils permettent également d'identifier les défis avant qu'ils ne deviennent des problèmes plus loin dans le projet. Ensuite, lors de la phase de chantier, il est impératif de s'assurer que **chaque étape est correctement documentée et photographiée.** Le drone donne aux entreprises de construction la possibilité de capturer des images aériennes de haute qualité et des séquences vidéo en vue d'étayer leur documentation (voir figure 47). A la fin du chantier, les vues prises par drone peuvent illustrer les PV de réception des travaux.

En matière de patrimoine, il est également précieux de disposer de supports visuels de qualité. Pour les bâtiments et les monuments très hauts comme les églises, les cathédrales ou les beffrois, le drone constitue un allié de choix. La possibilité de créer des scans 3D de grande qualité visuelle s'avère aussi extrêmement utile pour garder une trace documentaire d'un monument, par exemple.

Les photos, les vidéos ou les représentations 3D produites à l'aide d'un drone peuvent bien sûr **servir de supports de communication.** Il peut s'agir de faire la promotion d'un projet immobilier ou encore d'illustrer le montage d'un système de rénovation innovant. **Il existe en fait de nombreuses possibilités de valorisation d'un modèle 3D de qualité pour une com-**

munication efficace. On peut, par exemple, recourir à un casque de réalité virtuelle ou encore à une vidéo dite ‘augmentée’. Cette dernière technologie consiste à intégrer la maquette virtuelle d’un bâtiment dans une vidéo de son futur site capturée par drone; le modèle 3D est ajusté aux images et semble ainsi appartenir à la réalité. Beaucoup d’éditeurs de logiciels proposent en outre des outils simplifiés pour la visualisation et l’annotation de nuages de points ou de maillages.

Parmi les livrables les plus fréquemment demandés dans le cadre de missions de documentation et de communication, on trouve :

- des vidéos et des photos (moyenne à haute résolution)
- des maillages 3D texturés.

D’une manière générale, les bénéfices de l’utilisation d’un drone dans cette catégorie de missions sont :

- des réalisations plus dynamiques
- des angles de vue inédits (ou obtenus plus facilement et à moindre coût par rapport aux techniques aériennes traditionnelles)
- des modèles très réalistes.



Fig. 47 Des visuels de haute qualité peuvent être générés afin d’appuyer la promotion d’un projet de construction ou du travail d’un entrepreneur.

5.2.2 INSPECTION

L’inspection est une des activités qui se prêtent le plus à l’utilisation du drone dans la construction. Dans le cas de la rénovation de bâtiments, cela concerne notamment l’ensemble des tâches d’observation permettant de **diagnostiquer les pathologies existantes**. Un couvreur pourra, par exemple, établir un devis sur la base des images produites en survolant une toiture existante. Que ce soit sur un chantier de construction neuve ou de rénovation, les drones ont le potentiel de réduire le coût du contrôle de qualité de toutes les interventions réalisées en hauteur. On pense, entre autres, à la vérification des opérations nécessaires pour empêcher l’eau de pénétrer dans un bâtiment en construction. Afin d’assurer le suivi, on peut en outre répéter l’inspection aux étapes clés du chantier. Les auteurs de projet auront ainsi une vue globale des problèmes rencontrés lors de l’exécution.

L’inspection des dégâts causés par des catastrophes naturelles ou des accidents constitue un autre exemple de missions pour lesquelles les drones se révèlent extrêmement pertinents (voir figure 48). **En effet, les drones peuvent être déployés très rapidement et apportent ainsi une solution parfaitement adaptée aux situations de crise.** De plus, ils permettent de limiter les risques d’une inspection dans un environnement compromis (présence de polluants dans l’air, structures instables, etc.).



Fig. 48 Analyse de dégâts sur site, suite à une explosion.

5. Analyse des opportunités pour le secteur de la construction

Notons que les **dispositifs de vision avancés**, présentés succinctement au § 3.2.2 (p. 24), constituent de précieux alliés pour de nombreux types d'inspection. Les **mesures thermographiques**, par exemple, s'avèrent très utiles tant pour diagnostiquer un bâtiment existant que pour valider la qualité de pose d'un élément, ou encore pour évaluer la performance d'une installation solaire. La transmission des images d'inspection en direct vers un opérateur au sol est d'ailleurs parfois très utile sur un chantier. Elle permet en effet de réduire le temps de réaction entre la constatation d'un problème et la proposition d'une solution. Les drones peuvent d'ailleurs être équipés de technologies automatiques de transmission des données, ce qui permet au responsable de chantier de recevoir des clichés en temps réel, sans nécessairement devoir être présent sur place.

L'inspection visuelle sur la base de photos ou de vidéos est donc grandement simplifiée par l'utilisation de drones (l'inspecteur n'a pas besoin d'échafaudage ni d'équipement de sécurité). **De manière plus innovante, il est aussi possible d'employer des représentations 3D pour faciliter les tâches d'inspection, ou pour mieux contextualiser les images capturées.** Ainsi, les photos prises lors d'une inspection par drone peuvent, par exemple, être localisées sur un modèle 3D de référence (nuages de points, modèle architectural ou même maquette BIM, voir figure 49). Cette technique facilite grandement l'analyse de l'expert ainsi que la communication de ses conclusions. L'expert peut aussi **se baser directement sur un modèle 3D photoréaliste, généré par photogrammétrie, par exemple, en vue d'effectuer son analyse (relevé de pathologies, évaluation de dégâts, etc.).** Grâce à un scan 3D de qualité, il dispose en effet d'une source complète d'informations sans devoir multiplier les visites sur site. A l'inverse, avec l'inspection photographique traditionnelle, il arrive que l'on passe à côté d'un élément important, ce qui impose de se déplacer à nouveau sur chantier pour prendre les clichés manquants.

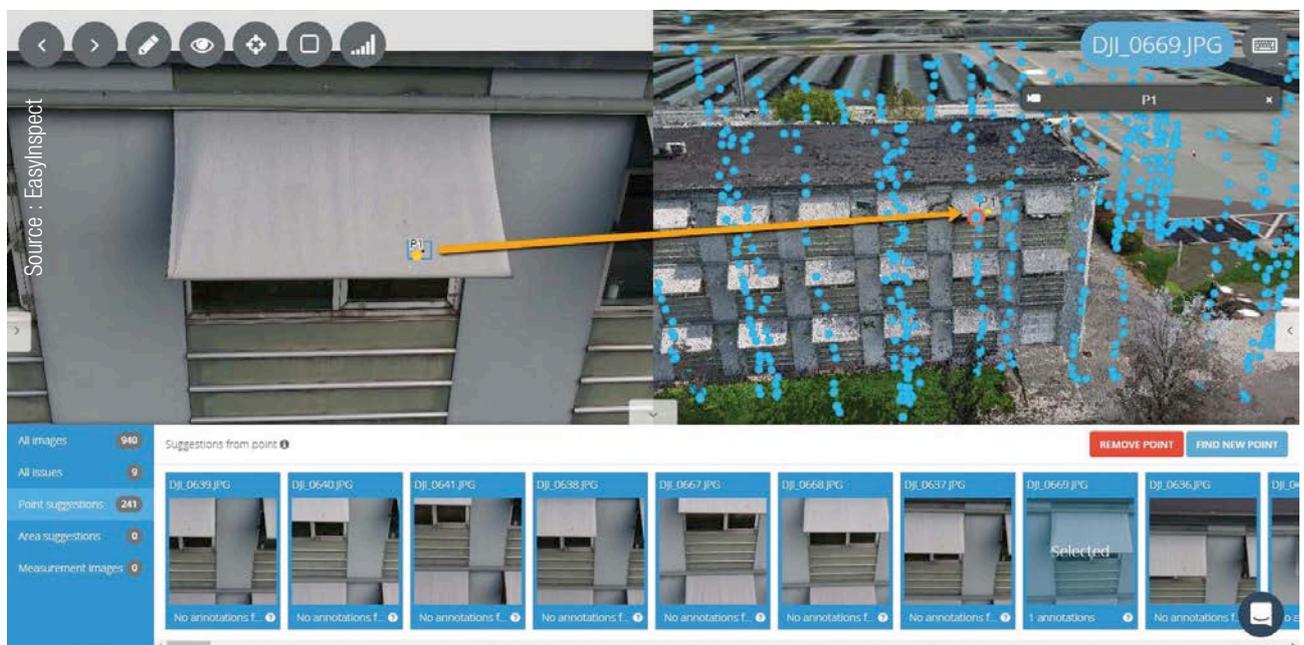


Fig. 49 Logiciel permettant de référencer la localisation d'une photo sur un modèle 3D de référence.

Les livrables fréquemment fournis lors de missions d'inspection sont :

- des photos en haute résolution
- des images thermographiques
- des maillages 3D avec texture photoréaliste.

D'une manière générale, les bénéfices de l'utilisation d'un drone pour des missions d'inspection sont :

- la diminution des risques pour les travailleurs (hauteur, exposition chimique, etc.)
- l'accessibilité et la vitesse d'exécution
- la possibilité d'automatiser l'inspection
- l'abaissement des coûts de l'inspection.

5.2.3 MESURES DE PRÉCISION : CONCEPTION, EXÉCUTION ET CONTRÔLE

Une multitude de situations nécessitent de capturer précisément les formes et les dimensions d'un bâtiment, d'une partie de celui-ci ou de son environnement. On parle de **relevé géométrique et de relevé topographique, des tâches clés pour le géomètre, l'entrepreneur ou l'architecte**. Traditionnellement, le relevé dimensionnel sur chantier s'effectue au moyen de stations totales et éventuellement d'une station GPS si une géolocalisation des données est requise. Le processus est bien documenté, mais il ne permet pas d'obtenir un modèle détaillé. Or, la haute définition offerte par la **photogrammétrie ou le scan laser ouvre des possibilités énormes en termes d'informations livrables : chaque brique d'un mur ou chaque pierre sur un terrain peut potentiellement être transcrite dans un modèle 3D et, qui plus est, en couleur !** Par conséquent, un relevé de terrain ou de bâtiment par drone doit toujours être centré sur la production de livrables bien définis (voir § 4.3, p. 39), sous peine de gaspiller de l'énergie, du temps et de l'argent à produire des modèles inutilement détaillés. Le commanditaire du relevé par drone doit **exprimer des objectifs techniques clairs**. Pour beaucoup de professionnels du bâtiment, une des principales utilisations des numérisations 3D consiste à les retranscrire sous forme de dessins en traits (CAO).

Bien sûr, il est aujourd'hui **impossible de parler de modèle 3D dans la construction sans citer le BIM**. L'intégration des informations géométriques précises sur le bâti existant dans un processus BIM est rapidement devenue une réalité, grâce au développement de technologies de scan 3D plus accessibles et à une meilleure interopérabilité des données 2D ou 3D entre les différents logiciels. Il existe ainsi de nombreuses manières de valoriser les nuages de points, les maillages ou les autres données collectées par drone dans le cadre d'une approche BIM.

Ce paragraphe vise à donner quelques perspectives intéressantes de l'utilisation des drones pour le relevé géométrique.

Relevés as-is de bâtiments pour la rénovation

En rénovation, le relevé 3D à haute définition ouvre la voie vers **une représentation précise et extrêmement complète des bâtiments existants**. Ces données 3D constituent une aubaine pour les responsables de projets de rénovation, les entrepreneurs et les fabricants, qui y puiseront une information très riche leur permettant d'optimiser leur travail. En effet, les plans existants des bâtiments anciens sont souvent incorrects ou incomplets, alors que les plans actualisés de manière traditionnelle se révèlent comparativement très peu détaillés dans de nombreux cas. Pour de tels relevés *as-is* ⁽⁴⁵⁾ du bâtiment entier, le drone offre en plus une très bonne accessibilité aux différents éléments extérieurs. **Les toitures peuvent, par exemple, être relevées facilement, sans que l'on doive déployer d'importants moyens [G1]**.

Les données 3D issues des relevés peuvent être retravaillées en vue de générer des livrables adéquats. Il peut s'agir de fichiers assez communs comme des dessins CAO en traits, ou d'autres, plus exigeants.

A partir d'un maillage ou d'un nuage de points généré par drone, il est aussi possible de produire une maquette BIM. On devra alors remodeliser complètement le bâtiment numérisé en objets paramétriques, sur la base du support 3D issu de la numérisation par drone. Malgré l'effort considérable que cela représente, on bénéficiera au final de tous les avantages du BIM pour un projet de rénovation, comme la possibilité de planifier le chantier et de mieux coordonner les différents acteurs de terrain. Ces derniers auront à leur disposition un modèle paramétrique complet ajusté au mieux à la réalité. La figure 50 rappelle la notion essentielle de 'niveau de détail' (*level of detail*) dans le cadre de la modélisation BIM. La transformation d'un maillage en modèle paramétrique peut en effet s'opérer de multiples façons selon l'information que l'on veut extraire.

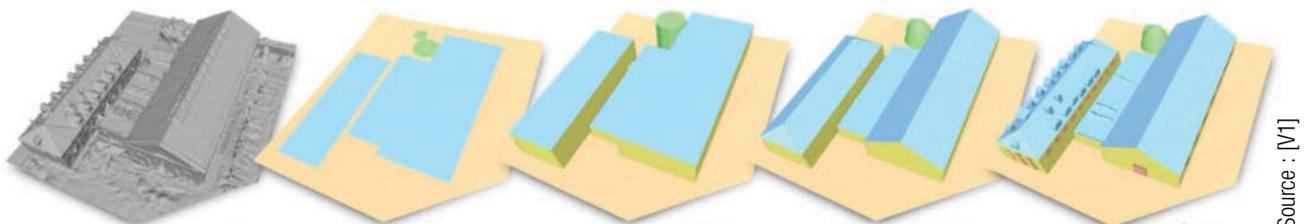


Fig. 50 Le niveau de détail dans la modélisation.

Source : [V1]

(45) Bâtiment dans son état actuel.

5. Analyse des opportunités pour le secteur de la construction

Les exigences relatives à la précision du relevé 3D varient d'une mission à l'autre. Pour les numérisations requérant une très haute justesse de mesure, l'exploitant du drone doit maîtriser les outils à sa disposition, afin d'optimiser la qualité de la reconstruction photogrammétrique. Certains logiciels récents permettent, par exemple, de planifier des vols automatiques complexes (voir figure 51). La qualité du géoréférencement des mesures s'avère également cruciale (voir § 4.2.1, p. 34). Dans certains cas, la photogrammétrie n'est tout simplement pas adaptée à la mission.

Relevés de contrôle

Il existe de nombreuses manières de valoriser le relevé géométrique d'un bâtiment à des fins de contrôle. Le relevé 3D périodique d'un chantier (bâtiment en construction, terrassement, etc.) permettra, par exemple, à l'entrepreneur de juger de l'avancement des travaux (voir figure 52). Dans ce cas, le drone a beaucoup à apporter en comparaison avec les solutions de relevé 3D traditionnelles. Les mouvements de machines sur chantier, la présence d'obstacles ou l'inaccessibilité de certaines zones peuvent effectivement rendre la tâche très difficile à un géomètre opérant depuis le sol. En outre, les possibilités de vol automatique garantissent une bonne cohérence des données récoltées. En effet, si les points de prise d'image sont similaires à chaque vol (grâce à l'emploi de points de passage GPS), les nuages de points ou les maillages issus de l'étude photogrammétrique auront en principe une qualité constante et pourront être comparés ⁽¹⁶⁾.

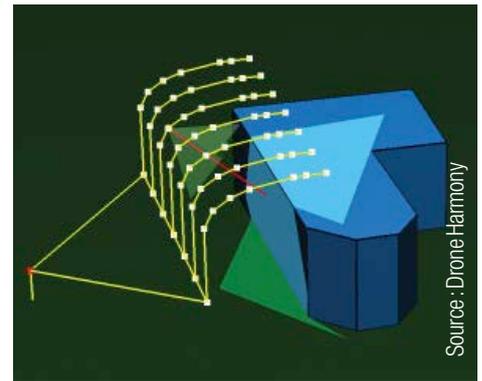


Fig. 51 Un plan de vol automatique optimisé pour la reconstruction d'une façade.

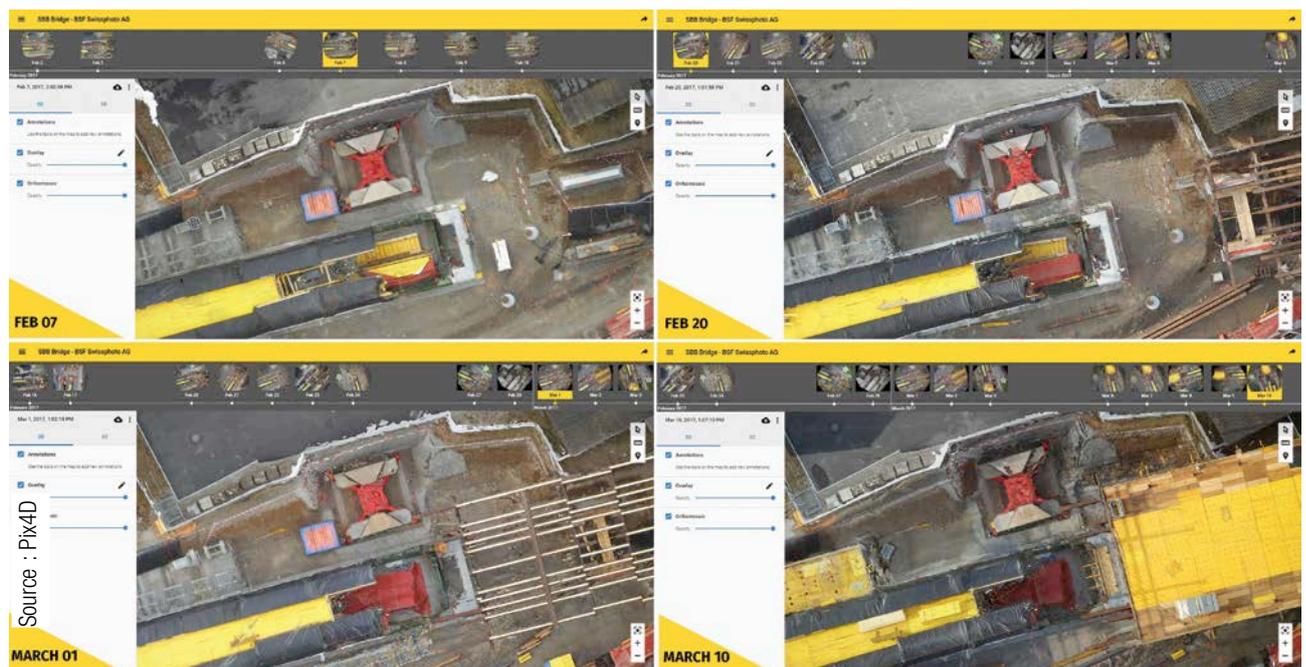


Fig. 52 Des relevés 3D peuvent être réalisés et archivés à intervalles réguliers afin de suivre le processus de construction.

Le contrôle d'avancement peut également être directement intégré au modèle BIM. En superposant la maquette virtuelle à un scan pris sur chantier à un moment donné, le responsable pourrait à l'avenir obtenir un aperçu automatique de l'avancement des opérations dans le cadre d'une approche BIM 4D [L1].

Avec un nuage de points ou un maillage, il est également possible d'effectuer un contrôle dimensionnel. Comparer un scan 3D réalisé par drone avec un modèle de référence permet de mettre en évidence d'éventuels écarts par rapport aux tolérances imposées. La comparaison entre le scan et la référence peut se faire de multiples façons : plans CAO superposés à une

⁽¹⁶⁾ Pour autant que les modalités de référencement soient également les mêmes entre deux itérations du relevé (points de contrôle au sol ou technologie RTK/PPK, voir § 4.2.1, p. 34).

orthophoto, modèle architectural comparé à un nuage de points, etc. Le cas échéant, le responsable peut ainsi prendre les mesures d'ajustement nécessaires, sans que les conséquences d'une mise en œuvre inadaptée ne se fassent ressentir lors de la suite des opérations (voir figure 53).

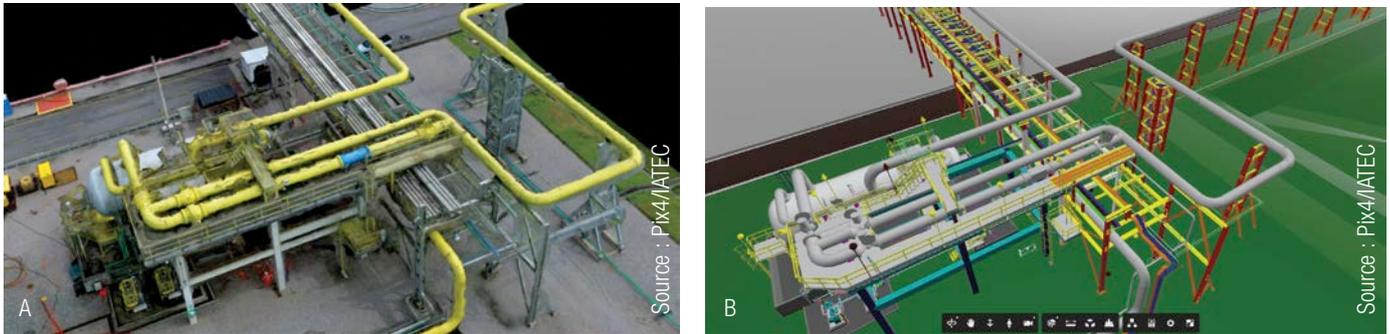


Fig. 53 Les maillages produits par photogrammétrie (A) peuvent être comparés aux modèles techniques CAO (B).

Relevés de terrains

Le relevé de terrain par les airs est une technique très courante. Les drones permettent de diminuer les coûts de telles études tout en améliorant la qualité de la retranscription 3D par photogrammétrie, grâce à une meilleure maîtrise des angles de vue. Les modèles de surface qui en découlent peuvent notamment être utilisés comme supports pour planifier ou pour suivre des opérations de terrassement (voir figure 54). De nombreux logiciels permettent également de calculer, de manière très intuitive, des volumes sur la base des maillages générés par photogrammétrie (voir figure 55). Le responsable du chantier pourra alors facilement évaluer les volumes de terre à déplacer. Mentionnons enfin qu'il est possible de réaliser de nombreuses analyses dimensionnelles grâce aux orthophotos.

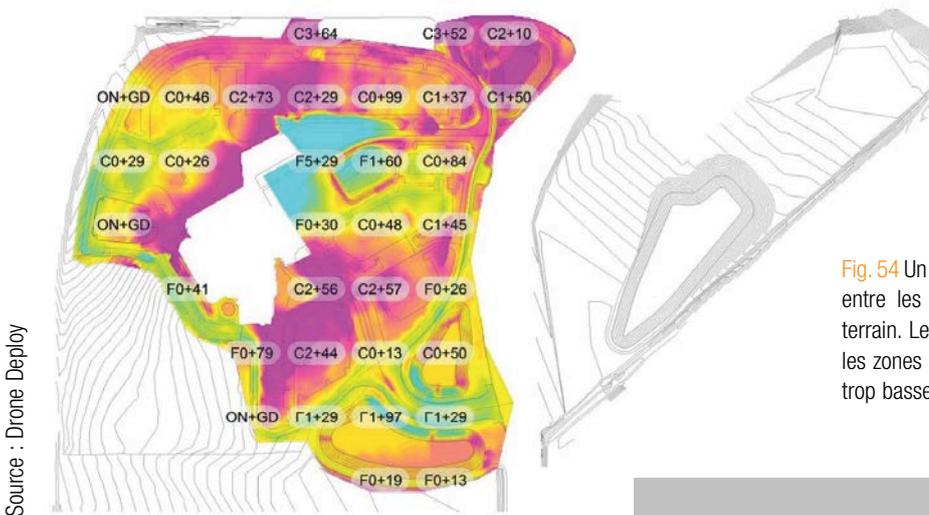
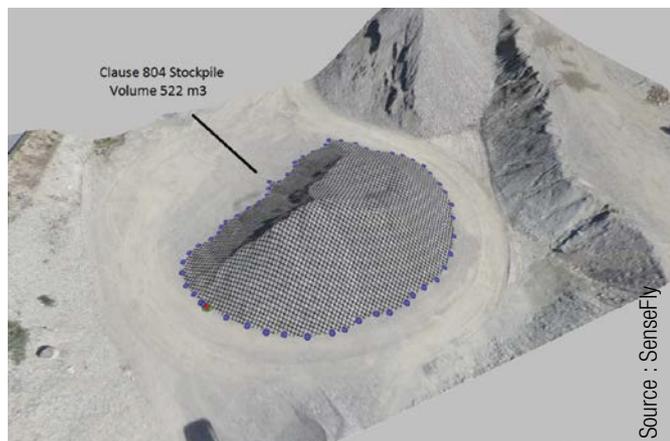


Fig. 54 Un code couleur permet de visualiser les écarts entre les plans de terrassement et le relevé d'un terrain. Les zones en vert sont conformes aux plans, les zones en mauve trop hautes et les zones en bleu trop basses.

Fig. 55 Les modèles 3D créés par drone peuvent servir à calculer des volumes.



5. Analyse des opportunités pour le secteur de la construction

Les livrables couramment fournis pour les études géométriques et topographiques sont :

- des nuages de points géoréférencés en haute résolution
- des modèles 3D texturés
- des orthophotos ou orthovues
- des modélisations géométriques : dessins en traits, modèles 3D, modèles BIM.

Parmi les avantages offerts par le drone dans le cadre de ces missions, on compte :

- la possibilité de numériser des zones difficiles d'accès (et parfois non accessibles par hélicoptère ou par avion)
- la possibilité de numériser des zones dangereuses où la sécurité du personnel au sol pourrait être compromise
- la possibilité de répéter une mesure dans le temps, éventuellement à l'aide de vols préprogrammés
- la réduction des coûts par rapport aux solutions aériennes conventionnelles (relevé par GPS/avion/hélicoptère, par exemple), en particulier pour les grandes surfaces à relever.

5.2.4 SURVEILLANCE ET MONITORING

Le drone apporte une aide précieuse à l'entrepreneur sur chantier en lui permettant de suivre les opérations en temps réel : déplacement d'équipements, montage d'éléments, tâches de terrassement, etc. (voir figure 56). S'il s'agit d'opérations sensibles, en termes de complexité ou de sécurité, le responsable pourra mieux coordonner les efforts au moyen des nombreux points de vue offerts par le drone. Grâce aux progrès de l'intelligence artificielle, le drone pourrait bientôt détecter automatiquement certains défauts d'exécution en temps réel.

Les drones peuvent également servir à monitorer les activités sur site pour la recherche d'éléments inhabituels ou de manquements aux règles de sécurité, ou simplement en vue d'optimiser l'utilisation de l'équipement.

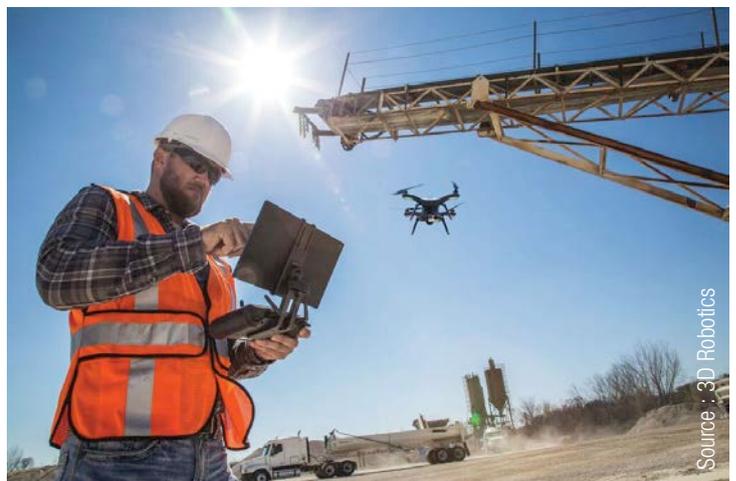


Fig. 56 Le drone permet de monitorer des opérations en temps réel.

Les livrables couramment demandés lors de missions de monitoring ou de surveillance sont :

- des vidéos ou des photographies en transmission directe
- des images thermographiques en transmission directe.

Parmi les bénéfices principaux de l'utilisation du drone dans ces missions, on compte :

- la rapidité d'intervention
- l'aptitude à passer d'une vue très générale à une vue détaillée, si nécessaire.

5.3 UTILISATIONS AVANCÉES

Si de nombreuses utilisations du drone ont déjà été éprouvées sur chantier, d'autres en sont encore au stade expérimental ou sont du moins beaucoup moins répandues. Toutefois, certaines d'entre elles préfigurent probablement l'avenir de la technologie.

5.3.1 LOGISTIQUE SUR CHANTIER

Au vu du recul qu'ils sont capables de prendre dans les airs, les drones peuvent devenir de réels acteurs de terrain. Les informations collectées par un ou plusieurs drones pourraient bientôt servir à organiser les opérations sur site en temps réel, grâce aux progrès de l'intelligence artificielle.

Au Japon, une entreprise fabrique déjà des engins de chantier autonomes. Pour en tirer le meilleur parti, la société s'est associée à un fabricant de drones afin de déployer une solution particulièrement innovante. Les drones créent des modèles de terrains de haute qualité qui servent à donner des ordres aux machines de génie civil au sol (voir figure 57). Grâce à cette technologie, un pas a été franchi dans la vitesse et l'efficacité de la valorisation des données collectées. A l'avenir, il est certain que l'évolution de l'intelligence artificielle devrait renforcer la présence des drones dans le domaine logistique sur chantier. Ils devraient ainsi permettre de suivre les flux de matériaux, d'optimiser l'utilisation de l'équipement, ou encore de guider les travailleurs dans la réalisation de certaines opérations. A terme, ils pourraient même transporter certains équipements d'un point à l'autre du chantier. Sur les sites industriels ou miniers, il est déjà possible de faire appel à des drones afin d'évaluer certains stocks extérieurs de manière régulière (grâce aux algorithmes de calcul de volumes) et donc de les gérer de manière plus intelligente.

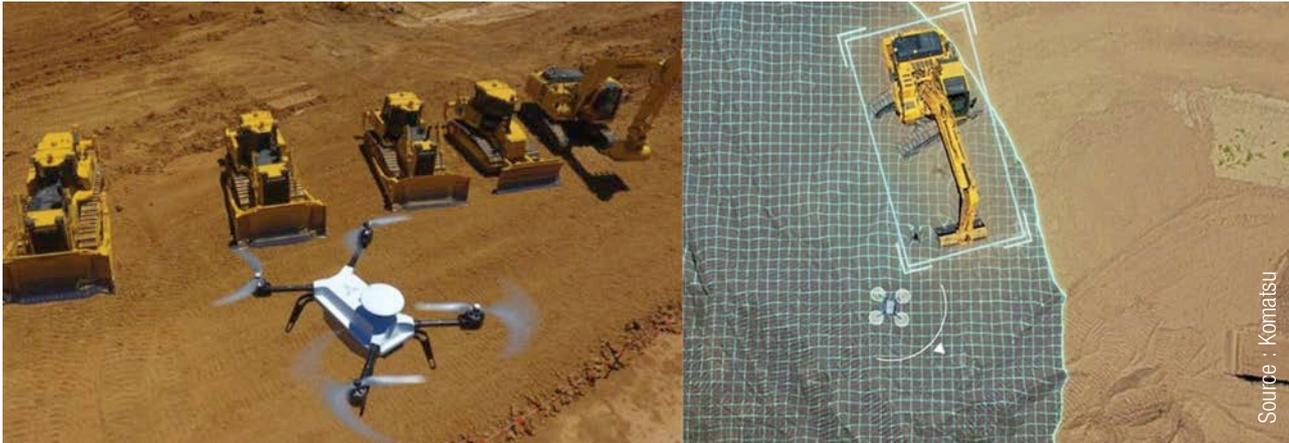


Fig. 57 Les drones peuvent être de véritables acteurs sur le terrain.

5.3.2 TRANSPORT D'OBJETS ET DE MATÉRIAUX

La charge utile d'un drone peut être mise à profit pour transporter de nombreux capteurs. Elle peut aussi théoriquement servir au transport d'objets. Pour le moment, les scénarios de livraison de colis postaux par drone, qui ont fait grand bruit dans la presse, semblent encore relever de la science-fiction. La mise en place d'un réseau dense et automatique de drones en milieu urbain impose en effet de nombreuses contraintes, principalement en termes de sécurité. Il semble que l'application de transport la plus réaliste aujourd'hui concerne les équipements d'urgence tels que le transport de vivres en zone de conflit ou encore le transport rapide d'organes [1].

Dans le domaine du bâtiment, on peut légitimement s'interroger sur la possibilité d'employer des drones pour le transport de matériaux sur site. Même si la réglementation actuelle (voir § 6.2.2, p. 54) n'autorise pas, pour l'instant, ce type d'applications, les premiers 'drones constructeurs' sont cependant à l'essai dans le cadre de la recherche (voir figure 58). Bien que de telles initiatives puissent paraître irréalistes au premier abord, le principe sous-jacent s'avère particulièrement intéressant : la méthode de construction traditionnelle est remise en question dans ses fondements. Ainsi, cette démarche pousse à la recherche de nouvelles formes pour les éléments de construction et incite à réinventer les techniques d'assemblage. En outre, des progrès sont réalisés en matière de manipulation



Fig. 58 Transport de matériaux de construction par drone.

5. Analyse des opportunités pour le secteur de la construction

d'objets par un drone, d'automatisation de son vol et de perception de son environnement. Ce type de drone n'interviendra peut-être pas demain sur chantier pour construire l'entièreté d'un bâtiment, mais il pourrait, par exemple, se révéler très utile pour certaines opérations d'assemblage délicates.

5.3.3 INTERVENTIONS SUR LES BÂTIMENTS

Les drones peuvent être employés pour agir directement sur des objets existants et en altérer les propriétés. A cet effet, l'aéronef doit être associé à des outils capables de réaliser des interventions physiques : nettoyer, décaper, peindre, forer, ... les possibilités sont multiples ! Comme dans de nombreuses applications décrites précédemment, la possibilité d'accéder à des zones difficiles rend les drones particulièrement intéressants. Se passer d'échafaudage, améliorer la sécurité des travailleurs ou accélérer la réalisation de certaines interventions sont autant de raisons qui justifient leur utilisation.

Une entreprise française commercialise d'ores et déjà un drone permettant de pulvériser des produits de nettoyage ou de protection sur les façades ou les toitures (voir figure 59). Rappelons cependant que l'arrêté royal qui régit l'utilisation des drones en Belgique n'autorise pas, pour le moment, ce type d'intervention (voir § 6.2.2, p. 54), même si une première entreprise belge a pu obtenir une dérogation.



Fig. 59 Utilisation d'un drone pour pulvériser une toiture.

5.3.4 CARTOGRAPHIE EN INTÉRIEUR

Les technologies SLAM (voir § 4.2.3, p. 38) relèvent encore principalement du domaine de la recherche. Les applications envisageables dans le secteur de la construction restent nombreuses : cartographie intérieure autonome de bâtiments structurellement instables, cartographie de parkings souterrains, recherches de blessés après des catastrophes naturelles, etc. Notons que le vol d'un drone à l'intérieur d'un bâtiment peut présenter des risques importants de dommages, en particulier lorsque des technologies expérimentales sont mises en œuvre. Afin de protéger le drone et son environnement lors d'un vol intérieur, on peut munir l'appareil d'une protection (voir § 3.2.4, p. 27).

6. SITUATION EN BELGIQUE

6.1 PRINCIPAUX ORGANISMES LIÉS AUX DRONES EN BELGIQUE

En Belgique, les acteurs liés aux drones sont plus nombreux chaque jour. Citons d'abord les acteurs institutionnels qui encadrent l'utilisation des drones dans l'espace aérien. Créé en 1960, **Eurocontrol** est l'organisme européen intergouvernemental chargé d'assurer la coopération entre les différentes administrations nationales compétentes en matière de trafic aérien. Il gère en outre le trafic de haute altitude dans les espaces aériens transfrontaliers de la Belgique, du Luxembourg, des Pays-Bas et d'une partie de l'Allemagne. Il n'intervient donc pas dans la gestion du vol des drones concernés par le présent document. La responsabilité du contrôle et de la sécurité du trafic aérien jusqu'à 24.500 pieds (ou $\pm 7,5$ km) incombe à **Skeyes**. On utilise le terme ATM (*Air Traffic Management*) pour désigner l'ensemble des systèmes et des services visant à garantir une gestion optimale du trafic aérien. Afin de répondre à sa mission, Skeyes est également en charge des infrastructures de collecte, de traitement et de transmission des données nécessaires (données météorologiques, zones de vol autorisées, par exemple). Parallèlement, la **DGTA** (Direction générale Transport aérien), qui fait partie du SPF Mobilité et Transports, élabore la politique nationale en matière d'aviation civile, en respectant les prescriptions des réglementations internationales et européennes. C'est à la DGTA qu'un exploitant de drone professionnel doit s'adresser pour obtenir, entre autres, des dérogations spécifiques à l'arrêté royal régissant l'utilisation des RPAS (pour voler en zone contrôlée, par exemple).

En plus de ces institutions, des fédérations professionnelles ont vu le jour. La **Belgian Drone Federation** (Fédération belge de l'aviation télépilote) est chargée de défendre les intérêts de toutes les entreprises et de tous les organismes actifs dans l'aviation sans pilote. Elle informe ses membres des évolutions des technologies et de la législation [D1]. Elle a notamment joué un rôle important dans l'élaboration de l'arrêté royal qui régit à présent l'utilisation des drones en Belgique. Ses membres sont répertoriés sur son site Internet, selon leur secteur d'activité (prestation de service, consultation, assurance, etc.). Par ailleurs, il existe deux clusters régionaux visant à soutenir le secteur du drone : 'EUKA' pour la Flandre et 'Skywin' pour la Wallonie. Leur mission consiste à stimuler le développement du secteur, par le biais d'une communication active avec leurs membres, de l'organisation d'événements, ou encore de la participation à des initiatives de recherche et de développement.

6.2 ENCADREMENT RÉGLEMENTAIRE

6.2.1 POURQUOI RÉGLEMENTER L'USAGE DES DRONES ?

Les drones peuvent largement bénéficier à l'industrie et à la société en général, mais un encadrement de leur utilisation s'avère indispensable. La première raison évidente est la nécessité de garantir la sécurité de l'espace aérien et de limiter tout risque de dommage matériel ou corporel (voir figure 6oA, p. 54).

Le survol des personnes constitue un point très sensible, car même un drone de moins d'un kilogramme peut déjà causer des blessures importantes en cas de chute ou de collision directe. En outre, il y a lieu de considérer les risques de collision avec les autres objets occupant l'espace aérien. En effet, les drones modernes, même destinés au grand public, peuvent facilement atteindre des altitudes similaires à celles des appareils d'aviation traditionnels : hélicoptères, avions, ULM ou encore montgolfières. A proximité des aéroports, ces risques sont bien sûr accrus. On comprend dès lors aisément que les drones ne peuvent pas échapper aux lois régissant l'espace aérien.

Un drone étant commandé à distance, il existe toujours un risque de perte de contrôle de l'appareil. Si cela arrive, et dans le meilleur des cas, le drone restera en vol stationnaire en attente de nouveaux ordres. Si le télépilote est plus malchanceux, le drone peut montrer un comportement bien moins prévisible. Même s'il existe des dispositifs de sécurité en cas de perte du signal, le télépilote ne peut se prémunir à cent pour cent des défaillances matérielles empêchant la récupération du contrôle. Si de telles circonstances viennent à se présenter, le télépilote doit pouvoir agir de manière efficace et ordonnée afin d'éviter des conséquences graves lors de la chute finale et irrémédiable du drone.

Un autre risque lié au pilotage à distance est la prise de contrôle malveillante par une personne tierce. Un petit dispositif électronique a, par exemple, été développé pour cibler certains systèmes de radiocommunication et s'emparer du contrôle du pilotage [Z1] (voir figure 6oB, p. 54). D'autres systèmes moins perfectionnés peuvent simplement brouiller les signaux destinés au drone, ce qui résultera, dans le meilleur des cas, en un atterrissage forcé.

6. Situation en Belgique

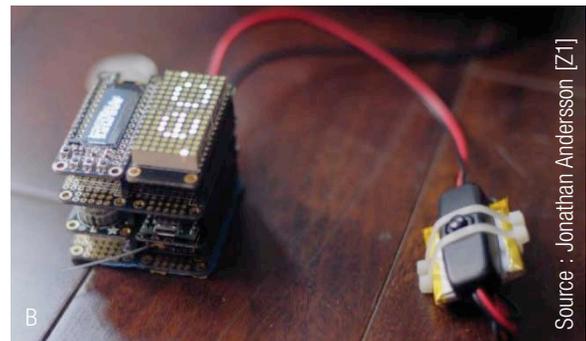


Fig. 60 Exemples de menaces qui imposent de réglementer l'usage des drones. A. Un drone bloqué sur des lignes électriques. B. Dispositif électronique capable de prendre le contrôle de certains drones au détriment du télépilote.

Le survol des sites dits 'sensibles', tels que les centrales nucléaires, les zones militaires ou les grands sites industriels, pose également question. Au-delà des éventuels risques d'attaque délibérée ou de crash potentiellement destructeur, la prise d'image s'avère aussi problématique. Il s'agit de la deuxième grande raison qui pousse à réglementer l'usage des drones : cette technologie peut porter préjudice au respect de la vie privée, au droit à l'image et à la confidentialité.

6.2.2 L'ARRÊTÉ ROYAL EN BELGIQUE

En Belgique, les vols de RPA (aéronefs télépilotés) sont encadrés par un arrêté royal publié au Moniteur belge le 15 avril 2016. La réglementation belge est basée sur la notion centrale de **classes d'exploitation, lesquelles sont définies selon le type de drone employé, mais aussi selon le niveau de risque encouru.**

L'utilisation récréative s'applique aux drones d'une masse maximale au décollage inférieure à 1 kg. Ils doivent être employés uniquement à des fins non professionnelles et le télépilote doit s'assurer de voler sous une hauteur maximale de 10 m et sur un domaine privé. On distingue ensuite deux classes pour une utilisation professionnelle :

- la classe 2 correspond aux vols à faible risque
- la classe 1 combine deux sous-classes : 1b pour les vols à risque modéré, et 1a pour les vols à risque accru.

Le vol sera considéré comme appartenant à la classe 2 si le drone fait moins de 5 kg et vole à 45 m d'altitude maximum, à 50 m de tout obstacle, hors d'une ville ou d'un village, et ce, sans survoler de personnes ni de groupes d'animaux. Dans tous les autres cas, on se trouvera en classe 1.

Les exigences associées à chaque classe d'exploitation sont bien sûr très différentes. Pour effectuer un vol de classe 2, l'opérateur doit être âgé de 16 ans au minimum et détenir **une attestation de télépilote** (délivrée au terme d'une formation théorique et d'un examen pratique). Il doit en outre immatriculer son drone à la DGTA et l'assurer en responsabilité civile. Les conditions sont plus strictes en classe 1. L'opérateur doit être âgé de 18 ans et passer **une licence de télépilote** (pour laquelle il devra réussir un examen pratique et théorique). De plus, le responsable de l'exploitation doit produire un **manuel d'exploitation**, qui est en fait un document de référence à valeur légale détaillant, entre autres, les types de missions prévues et les procédures générales applicables avant, durant et après le vol. Ce manuel contient également un formulaire d'analyse de risque qui permet à l'exploitant de déterminer, pour chaque vol, s'il s'agit d'une exploitation de classe 1a ou de classe 1b. Le survol de personnes implique, par exemple, nécessairement un vol de classe 1a, et donc une demande d'autorisation de la DGTA avant la première exploitation. Notons que les quadricoptères ne peuvent pas effectuer de missions de classe 1a si le survol de personnes est envisagé. L'exploitant doit alors se tourner vers les hexacoptères ou les octocoptères (voir § 2.2.2, p. 12).

Dans tous les cas, les vols suivants restent interdits :

- vols dans les espaces aériens contrôlés
- vols dans un rayon de 1,5 milles nautiques ⁽¹⁷⁾ (± 3 km) autour des aéroports et des aérodromes
- vols dans un rayon de 0,5 milles nautiques (± 1 km) autour des héliports
- vols à proximité et au-dessus des installations électriques ou nucléaires, des prisons, des complexes industriels
- vols à une altitude supérieure à 300 pieds (± 90 m)
- vols hors de la portée visuelle du télépilote ou de l'un des deux observateurs RPA (et donc les vols de nuit)
- vols impliquant le transport de personnes ou de marchandises
- vols impliquant le jet d'objets ou la pulvérisation en vol
- vols impliquant un remorquage
- vols acrobatiques ou vols en formation.

De tels vols ne pourront être réalisés que sur dérogation, moyennant une autorisation explicite délivrée par la DGTA.

Le tableau 4 résume les principaux aspects de la législation en vigueur ⁽¹⁸⁾. Le lecteur trouvera de nombreuses informations supplémentaires sur le site Internet de la DGTA [S1]. Seuls les vols en extérieur sont soumis à la réglementation de l'arrêté royal. La DGTA ne détient pas de compétence en matière de vol à l'intérieur d'un bâtiment. L'exploitant du drone doit cependant respecter la loi et éviter notamment de mettre en danger la vie d'autrui. Les principes du droit à l'image et du respect de la vie privée restent bien sûr également d'application.

Tableau 4 Synthèse de la législation en vigueur en Belgique.

Utilisation	Récréative	Classe 2 (risque faible)	Classe 1b (risque modéré)	Classe 1a (risque accru)
Drone	Poids ≤ 1 kg	Poids ≤ 5 kg	Poids ≤ 150 kg	
	Le drone ne doit pas disposer d'un certificat de conformité			Le drone doit disposer d'un certificat de conformité
	Le drone ne doit pas être enregistré	Le drone doit être enregistré à la DGTA		
Télépilote	Tous les âges	Minimum 16 ans	Minimum 18 ans	
	Pas de formation requise	Détenteur d'une attestation de télépilote	Détenteur d'une licence de télépilote	
Vol	Le vol a lieu hors des villes et des villages Pas de survol d'animaux ou de personnes			Vol dans les villes et les villages possible Survol d'animaux ou de personnes possible
	Altitude maximale = 10 m	Altitude maximale = 150 pieds (± 45 m)	Altitude maximale = 300 pieds (± 90 m)	
	Le vol n'est pas à but commercial ou professionnel Uniquement dans un domaine privé	Utilisation professionnelle possible Survol d'un terrain public possible		
	La DGTA n'est pas consultée		Vol déclaré à la DGTA	Vol soumis à l'autorisation de la DGTA
Autre	Aucun manuel d'exploitation n'est requis		L'exploitant doit disposer d'un manuel d'exploitation	

⁽¹⁷⁾ Un mille nautique correspond à 1.852 mètres.

⁽¹⁸⁾ A l'heure de la rédaction de ce document, une nouvelle réglementation européenne vient d'être approuvée et entrera en vigueur dès juillet 2020. Il s'agit du règlement délégué (UE) n° 2019/945 et du règlement d'exécution (UE) n° 2019/947 approuvés le 1^{er} juillet 2019 avec une période de transition d'un an.

6. Situation en Belgique

Comme on peut le constater, la sécurité constitue un aspect essentiel de l'emploi des drones. Rappelons quelques critères permettant d'évaluer le niveau de sécurité d'un drone :

- le nombre et la redondance des moteurs (voir figure 61) : un drone Y6 ou X8 (voir § 2.2.2, p. 12) présente moins de risque de perte de contrôle totale en cas de dysfonctionnement d'un de ses moteurs
- la redondance électronique et la résistance aux interférences : certains drones professionnels sont munis de plusieurs exemplaires des composants électroniques vitaux
- la fiabilité de la batterie et de la télémétrie
- la résistance aux intempéries et aux températures extrêmes : un drone peut, par exemple, être muni de moteurs étanches insensibles à la pluie. La résistance au vent est également importante pour certaines missions
- le comportement et les procédures automatiques en cas de perte de transmission entre le drone et la télécommande
- la détection d'obstacles. Certains drones sont équipés de dispositifs permettant de détecter des obstacles dans le champ de l'appareil et même d'enclencher une procédure d'évitement automatique. Ces détecteurs peuvent couvrir une seule direction (vers l'avant du drone, par exemple) ou plusieurs. Le télépilote doit rester extrêmement vigilant quant à ces dispositifs et ne peut en aucun cas effectuer des manœuvres risquées en se fiant uniquement à ces systèmes.

Ces critères de sécurité seront d'autant plus décisifs que le drone est imposant et lourd.



Fig. 61 Redondance des moteurs.

Outre l'arrêté royal, le prestataire du vol par drone est évidemment tenu de respecter la loi. Les prescriptions légales peuvent, par exemple, être liées au matériel utilisé. Ainsi, les puissances maximales des ondes radio utilisées pour manœuvrer le drone et pour récupérer les données collectées à distance (retour vidéo, par exemple) sont limitées à 100 mW et 25 mW, soit respectivement aux fréquences de 2,4 GHz et 5,8 GHz. Il incombe également à l'exploitant d'assurer son drone en responsabilité civile et de se conformer aux lois relatives au respect de la vie privée.

7. ANALYSE DES OBSTACLES

Bien que l'utilisation des drones offre de réelles opportunités, **il importe de tenir compte d'un certain nombre d'obstacles sérieux à leur déploiement sur les chantiers de construction**. On peut d'abord recenser une série de freins généraux liés à l'acceptation de la technologie et à la perception, justifiée ou non, de certains risques quant à leur utilisation ou à leur déploiement en entreprise. Même une fois convaincu par la technologie, il reste une série d'obstacles pratiques plus spécifiques pouvant apparaître lors de la réalisation d'une mission.

7.1 FREINS GLOBAUX À L'UTILISATION DES DRONES

Il existe plusieurs raisons qui peuvent empêcher un acteur professionnel d'envisager l'utilisation des drones. D'autre part, le drone est **une technologie potentiellement très intrusive**. La photographie aérienne soulève beaucoup de questions quant au droit à l'image et au respect de la vie privée. Afin d'éviter les conflits, ou par principe idéologique, certains seront donc instinctivement enclins à écarter cette technologie. D'autre part, en ce qui concerne la connaissance de la technologie, beaucoup ne perçoivent simplement pas comment les drones peuvent optimiser leur travail. Il reste là un grand travail de sensibilisation et de formation aux nouvelles technologies numériques.

L'utilisation d'un drone ne s'improvise pas et il faut du temps pour développer les compétences requises pour une acquisition optimale de données. Beaucoup choisiront donc naturellement de **sous-traiter les vols et la production des livrables**. Pour ceux-là, les risques sont évidemment limités. Ils se reposeront sur le savoir-faire du prestataire désigné. Il s'agit toutefois de bien définir ce que l'on veut obtenir et de savoir comment les résultats seront valorisés. Une mauvaise définition des objectifs causera inévitablement une insatisfaction, dont l'exploitant du drone ne pourrait être tenu responsable. Sans valorisation adéquate des livrables, le coût inhérent à la prestation pourrait s'avérer difficile à justifier. Notons, par ailleurs, que la grande quantité de données potentiellement produites par un drone doit être gérée de manière adéquate. Imaginons un chantier dont le suivi serait assuré par une campagne quotidienne de photographies par drones. Le responsable se retrouverait rapidement avec plusieurs gigaoctets de données qu'il faudrait pouvoir archiver efficacement. Dans les plus grosses entreprises, ces besoins en termes de définitions stratégique et opérationnelle peuvent nécessiter la désignation, en interne, d'un expert chargé spécialement d'encadrer la réalisation des missions par drone.

Si les missions par drone se répètent, il peut se révéler judicieux d'intégrer la compétence au sein de l'organisme ou de l'entreprise. Cependant, franchir ce cap engendre des **coûts immédiats importants** liés à la transition (formation, acquisition de logiciels, entretien des bases de données, etc.). Ces coûts peuvent constituer un obstacle majeur pour les petites structures, dans lesquelles les investissements à long terme peuvent représenter une menace pour l'équilibre budgétaire. Même si des drones peu coûteux⁽⁹⁾ peuvent parfois convenir aux tâches envisagées, les coûts opérationnels, parfois très importants, ne peuvent être négligés. L'organisation de la compétence 'drone' au sein de l'entreprise ne doit pas être prise à la légère.

7.2 OBSTACLES SPÉCIFIQUES LORS DE LA RÉALISATION D'UNE MISSION

Cette section présente **les risques auxquels l'exploitant et le télépilote peuvent être confrontés lors de la réalisation de missions**. Ceux-ci sont classés selon les phases de la réalisation d'une mission lors desquelles ils se présentent.

On distingue plusieurs grandes familles d'obstacles. D'abord, **les obstacles qui ont trait à la maîtrise de l'outil, à la compréhension de ses possibilités et au respect du cadre réglementaire**. Ensuite, **les obstacles liés à la technologie en elle-même, à ses limites intrinsèques et à l'éventualité d'une défaillance**. Enfin, **les accidents ou les événements exceptionnels difficilement prévisibles**.

⁽⁹⁾ Un budget de 2.000 € permet déjà d'acquérir un appareil performant.

7. Analyse des obstacles

Préparation de la mission

La préparation de la mission regroupe une série de tâches qu'il est essentiel d'effectuer avant de se rendre sur le terrain. L'opérateur doit d'abord s'assurer de **bien comprendre les objectifs finaux du vol prévu**, et en déduire un **plan de vol**. Idéalement, il doit discuter des livrables attendus avec le commanditaire de l'étude, afin d'établir un cahier des charges de mission précis : le niveau de précision attendu dans le relevé 3D est un des critères à définir sur papier. Le plan de vol s'élabore au moyen d'une analyse poussée du site concerné, qui consiste à identifier l'objet d'intérêt et sa position dans le contexte spatial plus large ainsi que les zones survolables du point de vue légal et pratique, mais aussi les obstacles et les dangers potentiels (y compris venant des bâtiments ou des terrains voisins). Barrières, poteaux, câbles électriques et antennes GSM sont autant d'exemples d'obstacles qui ne sont pas nécessairement identifiables à partir d'images satellites. Une visite sur site permettra en général d'éviter les mauvaises surprises ! Il convient également de consulter les cartes aéronautiques au préalable, afin de déterminer si la zone de vol est soumise à des dispositions particulières. Une dérogation aux règles de vol RPAS peut éventuellement être requise ^(2°), auquel cas seule la DGTA est apte à émettre une autorisation de vol. Avant chaque mission, l'opérateur doit toujours veiller à disposer de l'ensemble des autorisations nécessaires : du propriétaire ou de son représentant, de la DGTA s'il s'agit d'une mission de classe 1A ou sous dérogation, ainsi que de toute autre personne ou entité exerçant une autorité sur le territoire survolé.

En vue d'optimiser la qualité des données collectées, l'opérateur peut avoir recours à **des outils permettant d'automatiser le vol**. Il devra alors encoder les points de passage du drone dans un logiciel spécialisé. Parfois, la prise d'image est elle-même automatisable. En photogrammétrie, une telle préprogrammation de la collecte de photos s'avère extrêmement pertinente et permet d'optimiser la qualité des fichiers 3D résultants. La personne qui encode les points de passage et les points de déclenchement de l'appareil photo doit cependant connaître l'impact des paramètres de prise de vue (la distance de photographie, le taux de recouvrement entre les photos successives, par exemple) sur la précision et la qualité de la reconstruction 3D. Il adaptera la planification du vol automatique aux critères explicités dans le cahier des charges de mission.

Le jour du vol, l'opérateur doit **consulter les informations aéronautiques du jour** afin de s'assurer qu'il peut voler sans enfreindre la réglementation aérienne et sans prendre de risques au regard de la météo. Le terme 'NOTAM' (*'Notice to Airmen'*) désigne les messages synthétiques publiés par Skeyes. Chaque NOTAM donne une information essentielle liée à la navigation aérienne (activation temporaire d'une zone interdite de survol, par exemple).

L'ultime étape pour l'équipe de terrain consiste à préparer le matériel nécessaire à la réalisation de la mission et à vérifier que tout est en bon état de fonctionnement. En outre, il importe de ne jamais oublier l'équipement d'urgence [E1] : matériel antifeu, GSM pour la communication aux services d'urgence ou encore matériel de premiers secours.

Préparation du vol sur site

Une fois sur site, le jour de la mission, le télépilote et son équipe doivent d'abord effectuer une série de vérifications **visant à déterminer si le vol est réalisable dans les conditions de sécurité pour lesquelles il a été préparé**. Si ce n'est pas le télépilote qui a réalisé l'étude de risques, il devra s'assurer que ses observations sur site correspondent à ce qui est mentionné dans l'étude. Il doit également parcourir l'ensemble des *check-lists* définies dans le manuel d'exploitation pour la préparation du vol. Voici quelques exemples de situations dans lesquelles le télépilote devra prendre la décision de ne pas voler :

- les conditions climatiques sont inadaptées (des nuages semblent menaçants, le vent est trop important, par exemple)
- la lumière ambiante est inadéquate ou trop faible (brouillard, par exemple)
- le lien visuel ne pourra pas être maintenu tout au long du vol planifié, en raison d'obstacles imprévus
- il existe un risque de collision (présence d'oiseaux, par exemple)
- aucune position de décollage sécurisée ne peut être établie
- des personnes ne respectent pas le périmètre de sécurité défini.

En dehors de ces situations claires, c'est parfois le 'sixième sens' du télépilote qui le fera renoncer à l'exécution de la mission. Dans le cas où le vol ne lui semble pas réalisable dans des conditions adaptées, il ne doit jamais se laisser influencer par une quelconque pression extérieure.

Lorsque les conditions de sécurité sont remplies, l'équipe devra déterminer si les données peuvent être collectées de manière optimale. Un ensoleillement trop rasant peut, par exemple, menacer la qualité finale d'une reconstruction photogrammétrique.

^(2°) La dérogation la plus fréquente est le vol en zone contrôlée.

Dans de nombreux cas, des opérations préparatoires ou des mesures complémentaires doivent être réalisées au sol avant le décollage. L'exemple le plus fréquent est [la pose de cibles en divers endroits pour le référencement des modèles 3D qui seront générés](#). Parfois, ces opérations nécessitent d'avoir accès à des zones particulières du site ou du bâtiment. Toutes les autorisations d'accès doivent bien sûr être demandées au préalable.

Une fois que les conditions d'une collecte de données optimale sont réunies, le télépilote devra délimiter la zone de décollage ainsi que les éventuels périmètres de sécurité. Il se rendra par ailleurs clairement identifiable (voir figure 62). La dernière étape est la vérification du bon fonctionnement du matériel, avant et après la mise sous tension. À cet effet, il est courant de suivre une *check-list* détaillée, qui doit être reprise dans le manuel d'exploitation. Au-delà de l'intégrité physique et électronique du matériel, la qualité de réception du signal GPS devra bien entendu être évaluée.



Fig. 62 Le pilote s'identifie clairement lors du relevé.

[Vol et réalisation des tâches](#)

Si le vol est opéré en collaboration avec un observateur ⁽²¹⁾, la qualité de la communication entre celui-ci et le pilote doit être validée une dernière fois avant de démarrer. Si nécessaire, le début de la mission sera annoncé aux personnes pertinentes (tour de contrôle si le vol a lieu dans une zone contrôlée, par exemple). Dans le cas d'un vol assisté par GPS, juste avant le décollage, le télépilote doit ensuite définir le point de '*Return to Home*' (voir § 3.4, p. 30) ainsi que la hauteur de vol de cette manœuvre d'urgence. Dès que le drone monte dans les airs, le télépilote teste la réponse du drone aux différentes commandes de mouvement. S'il constate une anomalie, il doit faire réatterrir le drone et tenter d'identifier la source du problème. Si le drone répond normalement aux commandes, le vol peut se poursuivre selon le plan fixé.

Tout au long du vol, le télépilote doit éviter les sources de distraction et se concentrer sur la réalisation des objectifs, tout en suivant les données de télémétrie (niveau de batterie, altitude, vitesse, etc.). Dans le cas d'un vol à double commande, au cours duquel un cadreur se concentre sur la prise d'images, une bonne coordination entre les deux opérateurs s'avère essentielle. Si le vol ou une partie du vol est automatique, le télépilote doit pouvoir reprendre contrôle du drone à tout instant en cas de menace pour la sécurité des opérations. Le manuel d'exploitation doit d'ailleurs aborder les manœuvres à réaliser en cas d'urgence. L'anomalie la plus redoutée reste la perte de contrôle totale du drone, associée à ce que l'on appelle un '*fly away*' : le drone part à la dérive sans moyen apparent de reprendre le contrôle. Si aucune solution ne fonctionne pour rétablir la liaison, le télépilote devra réagir très rapidement.

La réalisation du vol semble être l'étape la plus délicate. Pourtant, si la préparation a été réalisée correctement, le télépilote et ses associés pourront rester sereins tout au long des opérations. Si un accident venait à se produire, malgré une préparation adéquate, le télépilote devra réagir adéquatement selon les procédures qu'il a définies dans son manuel d'exploitation.

[Traitement, gestion et utilisation des données](#)

Juste après le vol, le télépilote doit suivre les *check-lists* postvol prévues dans le manuel d'exploitation. Il remplit ensuite les différents carnets de vol. En outre, il est conseillé de garder une trace des observations faites lors de la mission qui sont jugées pertinentes pour améliorer la qualité des relevés futurs. Tant qu'il se trouve sur site, le télépilote peut aussi vérifier la qualité des données récoltées au regard des objectifs fixés.

Une fois de retour dans ses bureaux, l'opérateur du drone doit bien sûr ranger son matériel de manière adéquate. Rappelons que le stockage des batteries demande des précautions particulières, en raison de leur caractère hautement inflammable. L'exploitant pourra profiter des périodes d'immobilisation du matériel pour effectuer les entretiens appropriés et les réparations nécessaires.

⁽²¹⁾ Le terme 'observateur' désigne une personne impliquée dans le vol qui aide le télépilote à réaliser les opérations en toute sécurité, notamment en gardant un contact visuel permanent avec le drone.

7. Analyse des obstacles

En réalité, la partie la plus difficile du travail qui suit le vol est la transformation et la gestion des données collectées. Pour les missions reposant sur l'utilisation de la photogrammétrie, le volume des photos collectées est très grand, tout comme la taille des modèles 3D résultants. Les modalités d'archivage de ces données forment donc une première difficulté dans la phase de traitement. Un archivage adéquat permettra de valoriser les modèles à différents moments d'un projet. La puissance informatique requise pour créer et manipuler des modèles 3D à haute définition est aussi considérable. L'exploitant ne doit pas sous-estimer l'investissement nécessaire en termes de matériel informatique. Une fois le modèle 3D brut obtenu, les posttraitements visant à générer les livrables finaux peuvent requérir des compétences très spécifiques. Les processus de modélisation '*scan-to-BIM*' ⁽²²⁾, par exemple, sont très récents et peu de formations poussées existent. En début de mission, l'exploitant doit toujours s'assurer de disposer des ressources appropriées pour répondre à la demande du commanditaire.

En dernier lieu, les livrables doivent être transmis à la personne qui en fera usage. Les modalités de cette transmission doivent en principe être stipulées clairement dans le cahier des charges de mission. Afin d'éviter de nombreuses sources d'insatisfaction, il est recommandé à l'exploitant du drone d'insister sur ce point au début de la collaboration avec le commanditaire du vol.

⁽²²⁾ Soit une modélisation BIM basée sur un nuage de points.

8. EVOLUTIONS FUTURES

Les technologies liées aux drones continueront à évoluer sensiblement au cours des prochaines années. En ce qui concerne les outils embarqués, tout d'abord, **la miniaturisation et la démocratisation de l'électronique suivront leur cours**. Elles rendront l'intégration de multiples capteurs sur une même plateforme plus commune, pour des relevés et des inspections toujours plus efficaces. Les drones tendront également vers **davantage d'autonomie, du point de vue énergétique bien entendu, mais surtout grâce à une intelligence accrue (intelligence artificielle)**. Petit à petit, les drones seront capables de prendre des décisions de manière indépendante, afin d'optimiser la productivité des missions ou encore de garantir une sécurité de vol maximale. Ils deviendront d'ailleurs plus actifs sur le chantier. Les vols coordonnés et autonomes de plusieurs appareils sont également au centre de certaines recherches; on parle de véritables 'essaims de drones' capables de réaliser des missions spécifiques très rapidement. Pour l'instant, la réalisation de vols groupés se limite, la plupart du temps, à des exercices artistiques ou à des tests militaires.

Outre les évolutions matérielles, les logiciels permettront certainement de **mieux encadrer le professionnel pour la réalisation des missions et la gestion des données obtenues**. Si l'intégration du drone dans le processus BIM n'en est qu'à ses débuts, on peut s'attendre à une amélioration considérable de l'interopérabilité entre les logiciels BIM et les logiciels dédiés au relevé 3D par drone. **Les logiciels de photogrammétrie devraient, eux aussi, continuer à évoluer et à se spécialiser**. Ils intégreront de meilleurs outils de planification de vol et devraient proposer des résultats toujours plus précis et plus facilement exploitables pour les acteurs de terrain. Les outils et les plateformes dédiés à la gestion de données s'avèrent également essentiels, car le drone est avant tout un producteur de données. La profusion de l'information posera sans doute des défis majeurs dans les années à venir.

Evidemment, toute évolution technologique, qu'elle intervienne au niveau du matériel ou des logiciels, ne peut être intégrée dans un secteur industriel **que si le contexte réglementaire s'y prête**. Les limites imposées par la réglementation devront évoluer face aux demandes émanant de l'industrie. Les interdictions actuelles concernant le vol BVLOS (*Beyond Visual Line of Sight*) ou le transport d'objets notamment sont perçues comme très restrictives par certains acteurs. **L'ouverture de certaines zones aériennes de basse altitude pour le vol des drones** au sein des périmètres actuellement interdits (autour des aéroports, par exemple) est aussi fortement attendue. En contrepartie, le nombre grandissant de drones en opération obligera certainement les autorités à accroître les contrôles, afin de garantir la sécurité et la vie privée de tout un chacun. A long terme, des infrastructures spécifiques permettant de coordonner le vol des différents appareils seront peut-être nécessaires.

L'utilité des drones pour le secteur de la construction ne fait aujourd'hui plus aucun doute. Il est cependant difficile de connaître avec certitude la manière dont les professionnels s'approprient cette technologie. En effet, même si l'on nous promet des engins hautement autonomes produisant des mesures toujours plus précises, il sera essentiel de disposer de canaux de formation adéquats. En outre, la révolution numérique repose sur l'idée d'un partage toujours plus grand de l'information entre les acteurs de la construction. Ces échanges impliquent de renforcer la collaboration entre les différents professionnels de la construction, mais aussi entre professionnels et exploitants de drones. Le métier de pilote de drone n'aura de sens que s'il est orienté vers la maximisation de la qualité des données collectées et de leur pertinence par rapport aux demandes réelles du secteur. Dans tous les cas, il est certain que le drone aura sa place sur les chantiers du futur (voir figure 63).



Fig. 63 Le drone aura sans aucun doute sa place sur le chantier du futur.

LIENS UTILES

RÉGLEMENTATION ET CONTRÔLE AÉRIEN

Skeyes

<https://www.skeyes.be/fr>

Direction générale Transport aérien

https://mobilit.belgium.be/fr/transport_aerien/drones

Drone guide (Skeyes)

<https://www.droneguide.be>

Drone Rules

dronerules.eu/fr/

European Aviation Safety Agency (Agence européenne de la sécurité aérienne)

<https://www.easa.europa.eu/easa-and-you/civil-drones-rpas>

FÉDÉRATIONS

Belgian Drone Federation (Fédération belge de l'aviation télépilote)

<https://belgiandronefederation.be/fr>

Skywin (cluster wallon dédié au drone)

<http://www.skywin.be/fr>

EUKA (cluster flamand dédié au drone)

<https://euka.org>

BIBLIOGRAPHIE

A

Audronis T.

A1 Building multicopter video drones. Birmingham, Packt Publishing, 2014.

Australian Certified UAV Operators

A2 What do we call them: UAV, UAS or RPAS? Consulté en ligne : <http://www.acuo.org.au/industry-information/terminology/what-do-we-call-them> (23/08/2017).

B

Beul M., Krombach N., Zhong Y., Droeschel D., Nieuwenhuisen M. et Behnke S.

B1 A High-performance MAV for Autonomous Navigation in Complex 3D Environments. Denver, Proceedings of International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), 2015.

C

CargoCopter project

C1 CargoCopter project. Disponible en ligne : <http://cargocopter.be/blog.html> (consulté le 25/07/2018).

Custers B.H.M, Oerlemans J.J. et Vergouw S.J.

C2 Het gebruik van drones. Meppel, Boom Lemma uitgevers, 2015.

D

de Saint Martin A.

D1 Les drones, la nouvelle révolution technologique. Bruxelles, Les études du Centre Jean Gol, 2015.

Dubois S., Vanhellefont Y. et de Bouw M.

D2 Le relevé 3D à l'heure du BIM : capturer la réalité en haute définition. Bruxelles, Centre scientifique et technique de la construction, 2018.

Dudka T.

D3 Photogrammétrie et modélisation 3D à partir d'images drone au sein de TPLM-3D. Mémoire de soutenance du diplôme d'Ingénieur INSA. Strasbourg, Institut national des sciences appliquées, 2015.

E

Espace Drone

E1 Manuel théorique du pilote RPAS. Corbais, Espace Drone, 2017.

G

Geerts L. et Dubois S.

G1 Utilité des drones pour le couvreur. Bruxelles, CSTC, Les Dossiers du CSTC n° 2, Cahier 4, 2018.

H

House of Lords (Royaume-Uni)

H1 Civilian Use of Drones in the EU. Londres, House of Lords European Union Committee, 2015.

J

Jobard R.

J1 Les drones. Fonctionnement, télépilotage, applications, réglementation. Paris, Eyrolles, 2^e édition, 2016.

L

Lamaille G., Lahaye J. et Vandenberghe T.

L1 L'utilisation du scanning laser 3D pour la documentation *as-built* des projets BIM. Bruxelles, La revue scientifique des instituts supérieurs industriels libres francophones belges (ISILF), vol. 30, 2016.

N

Navigant Consulting

N1 Drones in construction – 2015 Survey Report. Rockville, WPL Publishing Co., 2016. Consulté en ligne : https://www.navigant.com/-/media/www/site/insights/construction/2016/con_dronesinconstructionq12016_tl_o216_final.pdf (16/10/2018).

S

SPF Mobilité et Transports

S1 Drones. Disponible en ligne : https://mobilit.belgium.be/fr/transport_aerien/drones (consulté le 03/08/2018).

V

Verdie Y., Lafarge F. et Alliez P.

V1 LOD generation for urban scenes. ACM Transactions on Graphics, Association for Computing Machinery, vol. 30, 2015.

Z

Zaffagni M.

Z1 Icarus, le boîtier qui peut pirater n'importe quel drone en plein vol. Disponible en ligne : <https://www.futura-sciences.com/tech/actualites/drone-icarus-boitier-peut-pirater-nimporte-drone-plein-vol-65063> (consulté le 03/08/2018).

Editeur responsable : Olivier Vandooren
CSTC, Rue du Lombard 42
1000 Bruxelles

Recherche • Développe • Informe

Principalement financé par les redevances de quelque 95.000 entreprises belges représentant la quasi-majorité des métiers de la construction, le CSTC incarne depuis plus de 55 ans le centre de référence en matière scientifique et technique, contribuant directement à l'amélioration de la qualité et de la productivité.

Recherche et innovation

L'introduction de techniques innovantes est vitale pour la survie d'une industrie. Orientées par les professionnels de la construction, entrepreneurs ou experts siégeant au sein des Comités techniques, les activités de recherche sont menées en parfaite symbiose avec les besoins quotidiens du secteur.

Avec l'aide de diverses instances officielles, le CSTC soutient l'innovation au sein des entreprises, en les conseillant dans des domaines en adéquation avec les enjeux actuels.

Développement, normalisation, certification et agréation

A la demande des acteurs publics ou privés, le CSTC réalise divers développements sous contrat. Collaborant activement aux travaux des instituts de normalisation, tant sur le plan national (NBN) qu'européen (CEN) ou international (ISO), ainsi qu'à ceux d'instances telles que l'Union belge pour l'agrément technique dans la construction (UBAtc), le Centre est idéalement placé pour identifier les besoins futurs des divers corps de métier et les y préparer au mieux.

Diffusion du savoir et soutien aux entreprises

Pour mettre le fruit de ses travaux au service de toutes les entreprises du secteur, le CSTC utilise largement l'outil électronique. Son site Internet adapté à la diversité des besoins des professionnels contient les ouvrages publiés par le Centre ainsi que plus de 1.000 normes relatives au secteur.

La formation et l'assistance technique personnalisée contribuent au devoir d'information. Aux côtés de quelque 750 sessions de cours et conférences thématiques impliquant les ingénieurs du CSTC, plus de 18.000 avis sont émis chaque année par la division Avis techniques.

SIÈGE SOCIAL

Rue du Lombard 42, B-1000 Bruxelles
Tél. 02/502 66 90
Fax 02/502 81 80
E-mail : info@bbri.be
Site Internet : www.cstc.be

BUREAUX

Lozenberg 7, B-1932 Sint-Stevens-Woluwe
Tél. 02/716 42 11
Fax 02/725 32 12

- Avis techniques – Publications
- Gestion – Qualité – Techniques de l'information
- Développement – Valorisation
- Agréments techniques – Normalisation

STATION EXPÉRIMENTALE

Avenue Pierre Holoffe 21, B-1342 Limelette
Tél. 02/655 77 11
Fax 02/653 07 29

- Recherche et innovation
 - Formation
 - Bibliothèque

BRUSSELS GREENBIZZ

Rue Dieudonné Lefèvre 17, B-1020 Bruxelles
Tél. 02/233 81 10