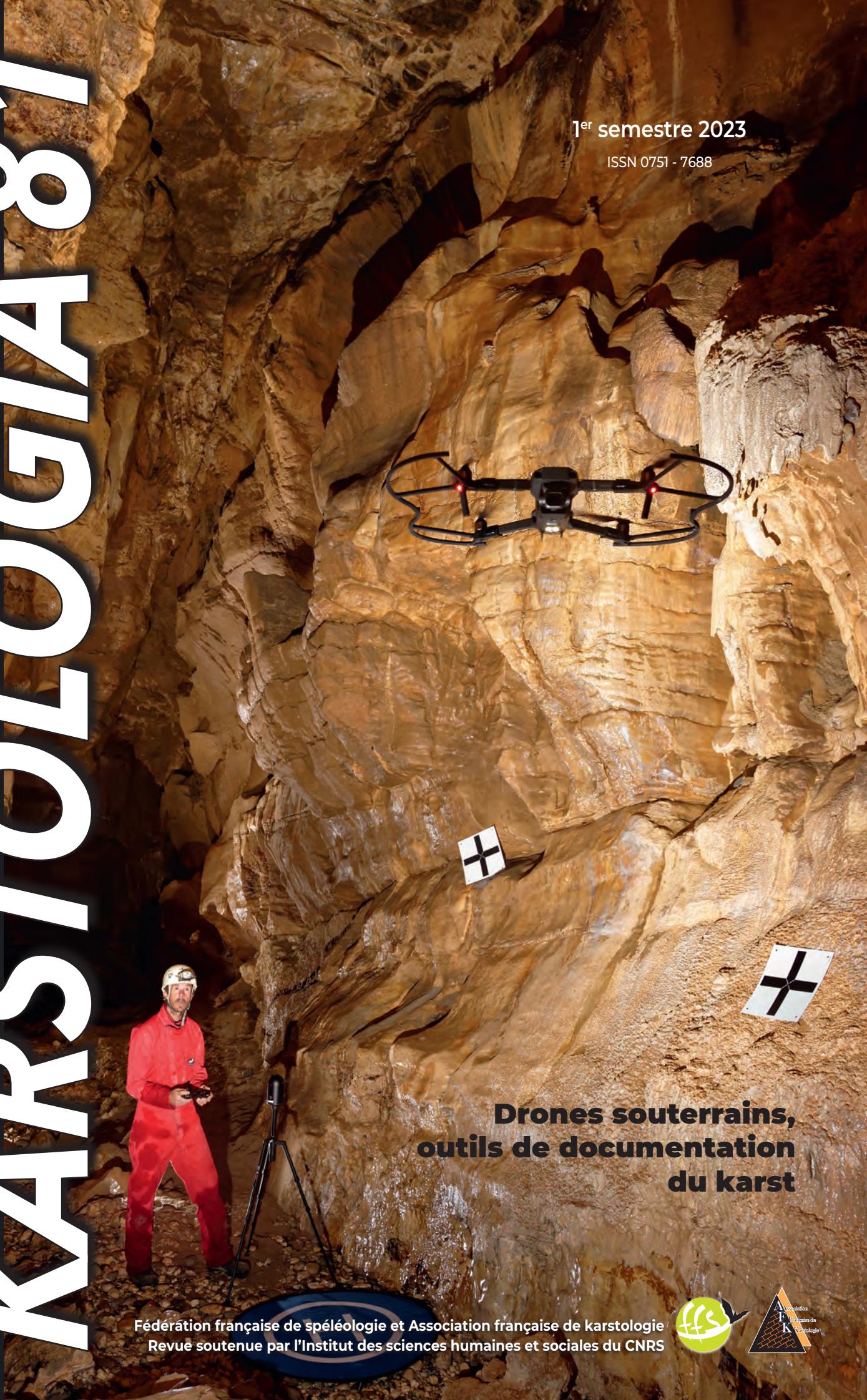


KARSTOLOGIA

1^{er} semestre 2023

ISSN 0751 - 7688



**Drones souterrains,
outils de documentation
du karst**

Fédération française de spéléologie et Association française de karstologie
Revue soutenue par l'Institut des sciences humaines et sociales du CNRS



Drones souterrains, inspection et imagerie 3D : contraintes et potentialités d'un nouvel outil de documentation des grottes et du karst

Stéphane JAILET¹, Laurence AUDIN², Stéphane BUJAN³, Gaël CAZES⁴, Armelle COUILLET⁵, Alexandre HONIAT⁶, Sylvia LOPEZ⁷, Gaël MONVOISIN⁸, Bertrand QUENAULT⁹ et Xavier ROBERT²

(1) EDYTEM, Univ. Savoie Mont Blanc, CNRS, 73376 Le Bourget-du-Lac

(2) ISTerre, IRD, Univ. Grenoble Alpes, 38000 Grenoble

(3) EPOC, Univ. Bordeaux, CNRS, 33615 Pessac

(4) Géosciences Montpellier, Univ. Montpellier, CNRS, 34090 Montpellier

(5) IDEES, Univ. Rouen Normandie, CNRS, 76130 Mont-Saint-Aignan

(6) Géologie Environnement Conseil, 09200 Saint-Girons

(7) LAB, Univ. Bordeaux, CNRS, 33615 Pessac

(8) GEOPS, Univ. Paris Saclay, CNRS, 91405 Orsay

(9) Inspection générale des Carrières Paris

RÉSUMÉ : Les drones ont connu, au cours des dernières années, une forte diversification de leurs usages. La réduction du poids des engins et la diminution des coûts concourent à ces développements. En grotte, l'usage des drones est limité par l'altération des capteurs d'assistance au télépilotage : GNSS, vision, capteurs d'évitement, centrale inertielle. Le télépilote doit alors conduire la mission avec le double objectif de maintenir l'intégrité de la machine, de la grotte et des personnels, tout en assurant une captation correcte des données. Un test de photogrammétrie 3D, conduit dans la grotte Sainte-Catherine (Ariège) montre un résultat satisfaisant et confirme l'intérêt des drones dans les constructions de modèles 3D en

grotte. Les conditions du pilotage, les conditions d'acquisition des données et les potentialités futures sont discutées.

MOTS-CLÉS : Drones, vol souterrain, photogrammétrie, CNRS Moulis, grotte Sainte-Catherine.

ABSTRACT: UNDERGROUND DRONES, INSPECTION AND 3D IMAGING: CONSTRAINTS AND POTENTIALITIES OF A NEW TOOL TO DOCUMENT CAVES AND KARST. Over the last few years, the use of the drones importantly diversified. The reduction in the weight of the UAVs and the strong decrease of the costs contributed to this development. But this development in confined environments as caves was initiating only recently. In fact, one of the key

limits to the use of drones in such environments remains the alteration of some remote assistance sensors: GNSS, vision, prevention sensors, and inertial unit. The pilot must then conduct the mission with the dual objective of preserving the integrity of the drone, the cave and the staff, while ensuring correct data capture. A 3D photogrammetry test conducted in the Sainte-Catherine cave (French Pyrenees) showed satisfactory results and confirmed the interest of drones in the construction of 3D models in caves. The conditions of piloting, the conditions of data acquisition and the future potential are discussed.

KEYWORDS: Drones, underground flight, photogrammetry, CNRS Moulis, Sainte-Catherine cave.

Introduction

Lorsqu'en 2012 sort le film *Promotheus* (Ridley Scott), les spectateurs visionnent une scène qui ne peut que faire rêver les topographes de grottes : dans un tunnel souterrain, un spationaute lance quelques sphères en l'air. Celles-ci s'envolent et se déplacent de manière autonome dans le conduit en émettant des rayons laser. Simultanément, dans la station orbitale, les sondes sont suivies et le modèle 3D du tunnel se construit en direct. Dix ans plus tard, la réalité semble s'approcher de ce qui était alors de la science-fiction. En effet, en une décennie seulement, les drones aériens (ou UAV, Unmanned Aerial Vehicle, en anglais) se sont considérablement améliorés. La diminution du poids, la qualité croissante

de la stabilité, l'amélioration des capteurs embarqués, la réduction du prix, tout concourt à une facilitation de l'utilisation des drones. Ces évolutions commerciales récentes ont surtout été développées jusqu'à présent pour des utilisations surtout en extérieur, plus rarement en intérieur, notamment en milieu industriel. Plusieurs développements ont permis des avancées dans l'inspection des carrières souterraines ou des égouts, qui présentent des contraintes particulières. D'une manière plus générale, dans le domaine de l'inspection industrielle, notamment par vidéo (vérification de structures, pylônes, tunnels etc.), le recours aux drones permet des économies de personnels qui justifient ces développements [Jordan *et al.*, 2018]. Mais qu'en est-il pour les grottes et les milieux souterrains ? Quels sont leurs usages aujourd'hui dans

Figure 1 : Vol d'un Mavic 2 pro, ici sans cage, lors d'un test à la grotte Sainte-Catherine (Ariège). Au sol sur la piste, un DJI Phantom 2. Les contraintes de pilotage sont nombreuses (absence de signal GNSS, vision limitée en lumière faible...).
Cliché S. Jailet

Mavic 2 pro flight, without any cage, during a training test at the Sainte-Catherine cave (Ariège). On the ground a DJI Phantom 2 is waiting for a flight test. Constraints for the pilot are here numerous (absence of GNSS signal, limited vision in low luminosity environment, etc.)

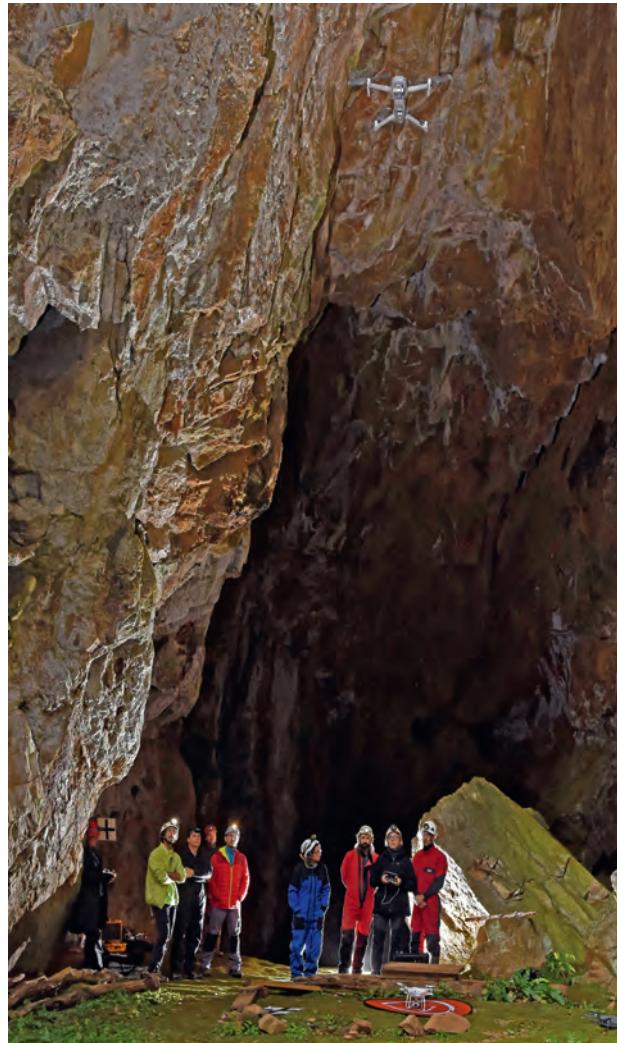
ces milieux confinés et pour des applications variées, scientifiques ou même spécifiques aux cavités souterraines naturelles ?

À travers cette note brève, nous nous proposons d'analyser les contraintes inhérentes au pilotage en milieu souterrain (figure 1), les conditions de captations d'images pour la documentation (photographie ou 3D) et enfin de discuter les potentialités de ce type d'outils pour les recherches de demain.

I. Pilotage en milieux souterrains

Faire décoller un drone en milieu souterrain ou confiné et le piloter implique de tenir compte des contraintes inhérentes aux spécificités du milieu. En extérieur, avec de bonnes conditions de réception GNSS et avec une luminosité correcte, plusieurs capteurs assistent le pilote dans la conduite de son engin. Parmi ces assistances, on compte essentiellement la stabilité, les corrections de dérives, les vitesses adaptées à l'approche d'obstacle, voire les évitements d'obstacles. En pratique, dans le cadre retenu ici, cinq éléments participent directement au pilotage et sont affectés partiellement ou totalement par les conditions particulières du milieu souterrain (figure 2). En extérieur, lorsque tous ces systèmes d'assistance à la navigation sont opérationnels, le lâcher des manettes se traduit toujours par une stabilité parfaite de l'engin, même en conditions aérologiques perturbées. Cela implique que chaque altération d'un des modes se traduit par une réduction de l'assistance au pilotage, même si la redondance autorise une altération partielle de ces modes. C'est ce que nous avons choisi d'évaluer en milieu souterrain.

Le GNSS (Global Navigation Satellite System) est le système de positionnement par satellites. Il intègre souvent plusieurs constellations : GPS (Global Positioning System, États-Unis), GLONASS (GLObalnaïa NAVigatsionnaïa Spoutnikovaïa Sistéma, Russie), GALILEO (Union Européenne) et BEIDOU (Chine) pour ne citer que les principaux. Ils participent au positionnement du drone avec une précision absolue de l'ordre de 5 m et relative de l'ordre de 1 m. Sous couvert forestier ou proche d'importants escarpements, le signal satellite est altéré. Sous terre, il est par définition complètement absent et ne peut donc être utilisé (figure 2). Cependant, il peut s'activer automatiquement ou manuellement à l'approche de la zone d'entrée ou, à l'inverse, si le décollage se fait en extérieur pour se diriger vers le milieu souterrain, l'accès au signal peut s'interrompre soudainement pendant la phase de vol.



Le mode VISION (Opti ou VPS, Vision Positioning System, chez DJI) est un mode activé par défaut sur certains appareils. Il devient prépondérant lorsque la réception GNSS ne peut être utilisée. Il est basé sur la reconnaissance, par caméra, des motifs au sol comme repères, ce qui constitue un outil d'assistance à la navigation et assure une stabilité excellente si la luminosité est suffisante, même sans satellite (figure 2) [Deng *et al.*, 2020]. C'est notamment un outil très efficace dans les phases d'atterrissement où la vitesse est réduite par le contrôleur interne, pour assurer une dépose en douceur. Sur certains appareils, un éclairage complémentaire s'allume et éclaire la zone sous le drone, en champ proche. C'est en revanche un mode qui peut occasionner des surprises sur des surfaces monochromes ou réfléchissantes (eau). Ce mode est limité en hauteur, généralement aux alentours de 5 à 8 m selon les appareils. Si ce mode est activé, l'appareil refuse de s'élancer au-delà de cette cote relative qui ne dépend pas du point de décollage. Il peut donc suivre une pente.

Des capteurs d'évitement d'obstacles peuvent aussi constituer des systèmes d'assistances au pilotage, assez efficaces. La plupart du temps, ces capteurs sont positionnés autour et sous l'appareil, rarement au-dessus. Certains appareils sont équipés de capteurs type sonar (ultra-son), mais ce sont la plupart du temps des capteurs

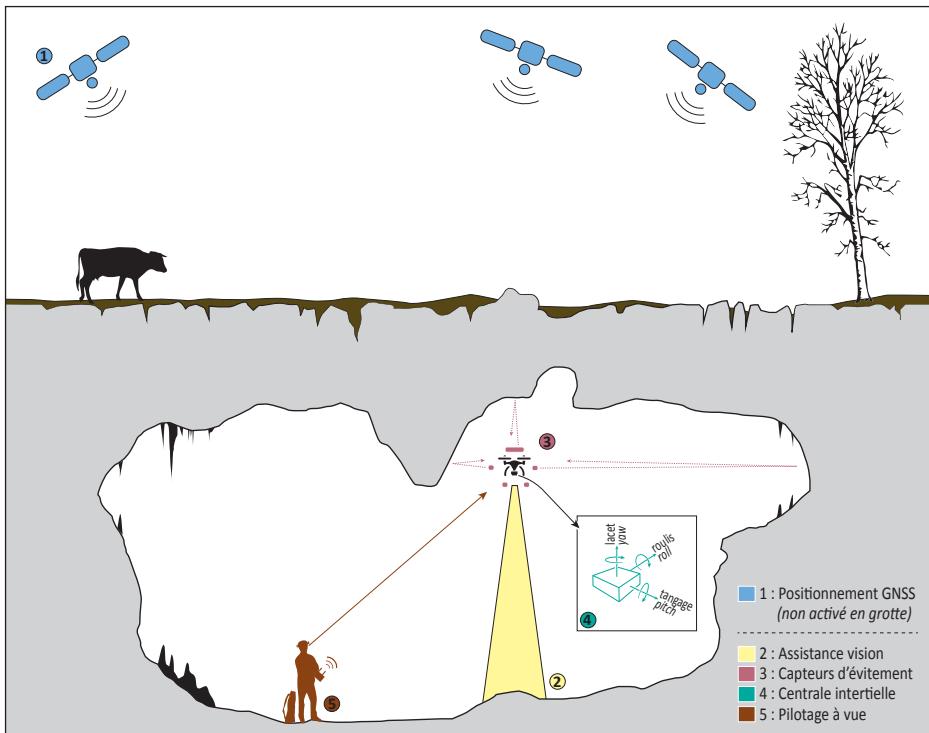


Figure 2 : Éléments participant à la stabilité du drone durant les phases de vol en grotte. Cinq systèmes concourant à la stabilité du vol sont identifiés et sont plus ou moins altérés en conditions sombres et sous plafond.

Elements involved in the stability of the UAV during the flight phases in caves. We identify five systems contributing to flight stability that are more or less altered in dark conditions and under a ceiling.

optiques [Eynard, 2011 ; Derome, 2017], stéréoscopiques comme sur le modèle Parrot Anafi AI, des capteurs infrarouges ou des capteurs lidars (laser) (figure 2). Sur le modèle DJI Mavic 3, huit capteurs optiques sont positionnés pour moitié sur le pourtour de l'appareil et pour moitié au-dessus et en dessous. Ils sont complétés par deux capteurs infrarouges en dessous. Outre l'évitement (le drone stoppe à l'arrivée de l'obstacle), ces capteurs donnent une information télémétrique (distance) en retour caméra (sur la tablette de pilotage), ceci dans une plage de l'ordre de 0,2 à 20 m et un champ visuel (FOV, Field Of View) de 90 à 160°. Dans le même ordre de méthode, l'odométrie est utilisée comme une technique de type stéréo-photographique en temps réel qui participe à la connaissance du déplacement de l'engin et assure l'évitement d'obstacle sur certains modèles (ex : Stereo2, Multinnov). Cette technique permet d'évaluer la position d'un véhicule en mouvement, c'est une mesure de bas niveau présente sur la plupart des robots mobiles.

La centrale inertuelle embarquée dans le drone assure une stabilité et au moins le contrôle de l'assiette (horizontalité). La centrale inertuelle (IMU, Inertial Measurement Unit, en anglais) est basée sur l'utilisation de gyroscopes et d'accéléromètres pour calculer roulis, tangage et lacet, soit tous les mouvements de translation du drone ou dans les faits de rotation autour d'un des trois axes (figure 2). Toutes les centrales inertielles nécessitent des phases de calibration car elles sont soumises à des dérives souvent assez fortes. Lorsque la réception GNSS est impossible et lorsque le mode vision n'est pas utilisable (environnement sombre, hauteur trop importante), l'assistance au pilotage devient très limitée. Le lâcher de commandes ne se traduit plus par l'immobilité de l'engin qui continue sa course de façon relativement erratique et qu'il faut donc en permanence contrôler. Sur DJI, c'est le mode ATTI (ATTItude), un pilotage plus actif, autorisant

tous les déplacements, mais sans les modes d'assistance. Le drone reste généralement horizontal, mais dérive systématiquement. Ce mode peut s'activer manuellement pour forcer le drone à quitter une zone de trop faible hauteur sans réception de satellite (fonds de canyon par exemple). Il peut aussi basculer automatiquement dans ce mode dans les phases de pertes de réception satellites (zone d'entrée de grotte) ou de pertes de vision (environnement soudain plus sombre, rupture de pente générant brutalement une hauteur importante).

D'autres capteurs peuvent ponctuellement être ajoutés à certains engins. Un compas électronique permet d'analyser en temps réel les modifications de trajectoire. Un baromètre, couplé à un thermomètre, enregistre les variations de pression et permet de mieux contraindre les changements d'altitude [Luiset, 2016]. Sur les drones à voilure fixe, un anémomètre complète parfois ces dispositifs en mesurant la vitesse relative de déplacement dans l'air.

Tous ces systèmes embarqués concourent à la stabilité du vol, à l'évitement des obstacles et à la connaissance de la position en temps réel. De plus en plus, les drones embarquent un contrôleur qui intègre les calculs et les informations issus de ces systèmes, participant ainsi aux bonnes conditions du vol. Il reste cependant assez difficile de savoir exactement quel système prend le pas sur quel autre, ou bien dans quelles conditions un système s'active et dans quelles conditions il se désactive. Est-ce un traitement informatique qui intègre au mieux ces différents paramètres ou un paramètre prend-il le pas sur un autre ? Selon les modèles, selon les constructeurs, les procédures et stratégies sont différentes et ces programmations sont finalement des systèmes fermés, des boîtes noires, sur lesquelles le pilote n'a souvent pas accès aux paramètres. Au-delà de ces systèmes, il reste le dernier et ultime contrôleur du vol : le télépilote.

Le télépilote est l'opérateur qui assure la conduite du vol, ici en site souterrain (figure 2). C'est lui qui assure la double mission de gérer à la fois le vol et la captation des données (photo en général). Équipé d'un écran, il contrôle à la fois les paramètres du drone (position, altitude, distance aux obstacles, autonomie des batteries) et garde un visuel direct sur l'engin. Dans certaines conditions, ce visuel direct peut être interrompu (virage dans la galerie, niche, zone non éclairée) et le pilotage se fait uniquement avec le retour écran, si la communication entre la télécommande et le drone n'est pas altérée. Le téléguidage peut aussi être rendu compliqué par la faible lumière ou son absence totale. Certains engins embarquent des éclairages puissants, comme le Stereo2 de Multinnov avec ses 12 000 lumens (figure 3). D'autres peuvent être équipés d'éclairages additionnels. Le recours à des panneaux leds éclairant la scène est une solution complémentaire parfois utile, mais restant limitée à un secteur proximal ou local préalablement instrumenté avec ces éclairages supplémentaires dans la cavité.

Tous ces éléments doivent être réunis pour assurer un vol dans des conditions correctes de sécurité tant pour l'engin, que pour les personnes ou la grotte. Selon la configuration des lieux, les conditions du vol et l'activation des systèmes au cours du vol, les phases de déplacement du drone évoluent, et s'ajoute une difficulté pour l'opérateur : détecter et connaître ces changements dans des conditions de visibilité limitée et avec une multitude d'obstacles. En zone d'entrée de cavité, le début du vol peut se faire en mode vision, puis il faut se préparer à perdre ce mode, anticiper que le drone peut passer automatiquement en ATTI et seulement après récupérer le mode GNSS (cas 1, figure 4). Lors du test sous terre, il a été possible de s'élever le long d'une pente en mode vision puis de passer en mode ATTI lors du vol sous plafond (cas 2, figure 4). Enfin l'entrée dans une galerie non visible du télépilote conduit à des modes type ATTI hors vue, avec dérive et contrôle uniquement par retour écran pour le télépilote (cas 3, figure 4).

II. Captation d'images et construction 3D

L'usage des drones sous terre est aujourd'hui essentiellement dédié à la production d'images, depuis les travaux d'inspection visuelle (directe ou par enregistrement, en photo ou en vidéo) jusqu'à l'acquisition de photos servant ensuite à des constructions photogrammétriques 3D à plusieurs échelles (du mm au mètre) [Triantafyllou *et al.*, 2019 ; Mörtl *et al.*, 2022]. Dans tous les cas, l'acquisition d'images sous terre implique de jouer au mieux avec les quatre paramètres généraux de la prise de vue photographique. La vitesse de la captation photographique ne peut être trop lente sous peine de risquer un flou de bougé. Des algorithmes ont d'ailleurs été développés spécifiquement pour corriger ces flous de bougé [Sieberth *et al.*, 2016]. L'ouverture ne peut être trop grande sous peine de perdre en profondeur de champ. La sensibilité ne peut être trop élevée sous peine de voir apparaître un bruit. Il reste enfin le quatrième paramètre, externe au drone et au matériel photographique : la possibilité d'apporter un éclairage complémentaire embarqué (figure 3) ou sur trépied. Plus la lumière embarquée, c'est-à-dire portée par le drone, ou déportée, pour éclairer la scène souterraine, est importante, plus les paramètres de vitesse, d'ouverture et de sensibilité seront faciles à fixer, ceci pour l'obtention d'une photographie correcte et exploitable.

La stabilité du vol en elle-même peut engendrer des problèmes sur la prise des photographies. Lors de nos premiers essais réalisés sous terre, le vent généré par les hélices du drone déplace les objets les plus mobiles comme des cibles légères posées au sol, rendant impossible leur usage pour les reconstructions 3D ou le retour atterrissage. Enfin l'angle d'inclinaison de la caméra est un élément limitant sur la plupart des drones commerciaux. Pensées pour être utilisées en visée vers le bas, les caméras peuvent s'incliner généralement de 0° (horizontal) à -90° (nadir). En grotte, la prise de vue vers le haut peut cependant



Figure 3 : Vol d'un drone Stereo2 de la société Multinnov lors d'un test de pilotage en zone profonde de la grotte Sainte-Catherine (Ariège). Notez la cage de protection, l'éclairage embarqué très puissant (12.000 lumens) et la caméra déportée en hauteur.
Cliché S. Jaiillet
Flight of Stereo2 (Multinnov company) during a test to pilot in the deep zone of the Sainte Catherine cave (Ariège). Note the drone's cage, powerful embedded lights (12000 lumens) and the camera at the top of the UAV.

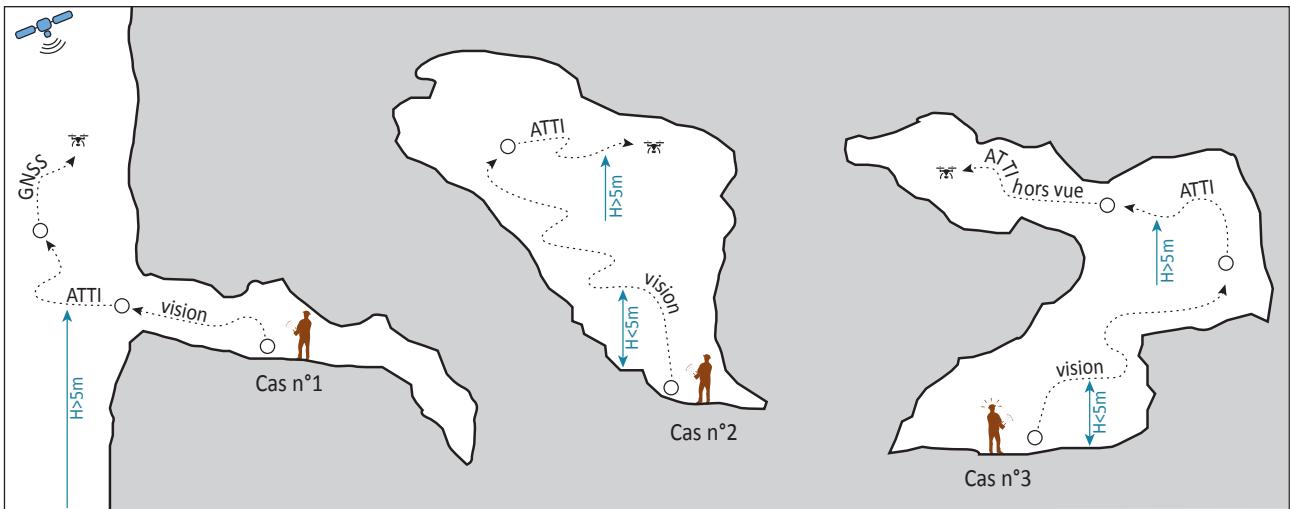


Figure 4 : Différentes configurations de pilotage en grotte avec activation ou non des capteurs et systèmes embarqués concourant à l'assistance au pilotage. Selon la position du drone dans l'espace de vol, les modes de pilotage changent et impliquent une bonne connaissance des procédures d'activation ou d'arrêt de ces systèmes. *Different piloting configurations in caves with or without activation of sensors and on-board systems contributing to piloting assistance. Depending on the position of the drone in the flight space, the piloting modes change and involve a good knowledge of the procedures for activating or stopping these modes.*

être nécessaire pour documenter ou inspecter le haut des parois et les plafonds. Testé ici, le Stereo2 (Multinnov) propose une caméra déportée en hauteur (capteur 4K Sony IMX117 1/2,3 pouces, 12MP, 3 840 x 2 160 pixels) qui autorise l'inspection des plafonds.

Dans le domaine de l'acquisition 3D [Jaillet *et al.*, 2014] se pose souvent la question de vols programmés ou non, afin de couvrir des surfaces complexes ou étendues. L'avantage des acquisitions automatiques avec plan de vol programmé est l'assurance de couvrir toute la scène à investir avec un taux de recouvrement entre images suffisant et homogène pour la reconstruction 3D. Mais sous terre, l'absence de réception GNSS et la méconnaissance *a priori* de la géométrie du site ne permettent pas ce type de vol. C'est donc le vol à vue et l'acquisition à la volée qui sont privilégiés, reposant sur l'expérience du télépilote et sur sa reconnaissance éventuelle de l'objectif avant le vol.

Un test a pu être réalisé dans la grotte Sainte-Catherine (Ariège) lors d'un atelier CNRS organisé spécialement dans ce but en novembre 2022. Une paroi de la zone nord, en obscurité totale a été retenue pour ce test. La procédure d'acquisition des données intégrait une pré-acquisition lasergrammétrique terrestre afin de contraindre la géométrie générale de la paroi et obtenir les coordonnées de repères placées dans la scène. Cette acquisition était faite avec un Faro Focus 3D utilisant une consolidation des scènes par la méthode des sphères (résolution anticipée centimétrique). Un vol drone a ensuite été réalisé avec un Mavic 2 pro permettant l'acquisition de 120 photographies pour le même objectif et pour

comparaison des deux modèles surfaciques *a posteriori*. La caméra embarquée était un Hasselblad, F/2,8, focale 10 mm équivalent 28 mm en 35 mm, résolution : 5 472 x 3 078 pixels. Les paramètres étaient les suivants : sensibilité ISO à 1600, vitesse à 1/60 et ouverture à 2,8. C'est une vitesse assez lente, mais qui constitue un compromis entre une vitesse suffisante pour éviter le flou de bougé et une sensibilité raisonnable pour éviter un bruit trop élevé. Nous avons également testé le mode de prises de vues automatique (réglage automatique de la caméra embarquée), mais cela impose une trop faible vitesse (1/30 s). Les photos n'ont pas été acquises à la volée mais chaque fois précédées d'une stabilisation manuelle de l'engin. La scène était éclairée depuis le sol avec un projecteur led, mais cet éclairage était plus efficace sur la partie gauche de la zone investie. Le traitement des données a été fait sur le logiciel SCENE pour les données LIDAR et sur Agisoft Photoscan pour les données photogrammétriques. Cet assemblage photogrammétrique est conduit sans les données de positionnement GNSS intégrées dans l'Exif des photos, technique désormais implantée dans les logiciels de traitement photogrammétrique [Jain, 2021]. Un premier nuage de 100 444 points a été ensuite densifié (qualité moyenne) à 4 915 773 points et maillé à 983 143 triangles (figure 5, A). Ce maillage allège le modèle et permet ensuite la comparaison nuage lasergrammétrique / maillage photogrammétrique. Le nuage de points lasergrammétrique a été segmenté à 5 639 685 points. Trois repères et deux sphères assurent la correspondance entre les deux modèles. L'ensemble des résultats est ensuite importé dans le logiciel Cyclone 3DR pour y être inspecté.

L'analyse des modèles fait apparaître trois résultats essentiels : (i) même en condition lumineuse faible, il est possible d'acquérir un lot de photos, de les traiter et d'obtenir un nuage photogrammétrique dense ; (ii) même avec un mode de prises de vues automatique (faible vitesse), la netteté des photographies reste étonnamment acceptable pour la construction du nuage photogrammétrique dense ; (iii) l'appariement du nuage photogrammétrique sur le nuage lasergrammétrique montre une excellente correspondance (interpénétration des couleurs) (figure 5, B) et garantit la justesse géométrique

du traitement photogrammétrique. La comparaison des deux modèles a été réalisée sous Cyclone 3DR et permet de montrer que 92,2 % des différences sont comprises dans un intervalle inférieur à 15 mm. Les points les plus mauvais, donc au-delà de cette valeur, se situent dans les creux (zones rouges, figure 5, C) ou les bords (zones bleues, figure 5, C). Pour autant, (iv) la luminosité de la scène n'est pas équilibrée et n'offre pas une restitution

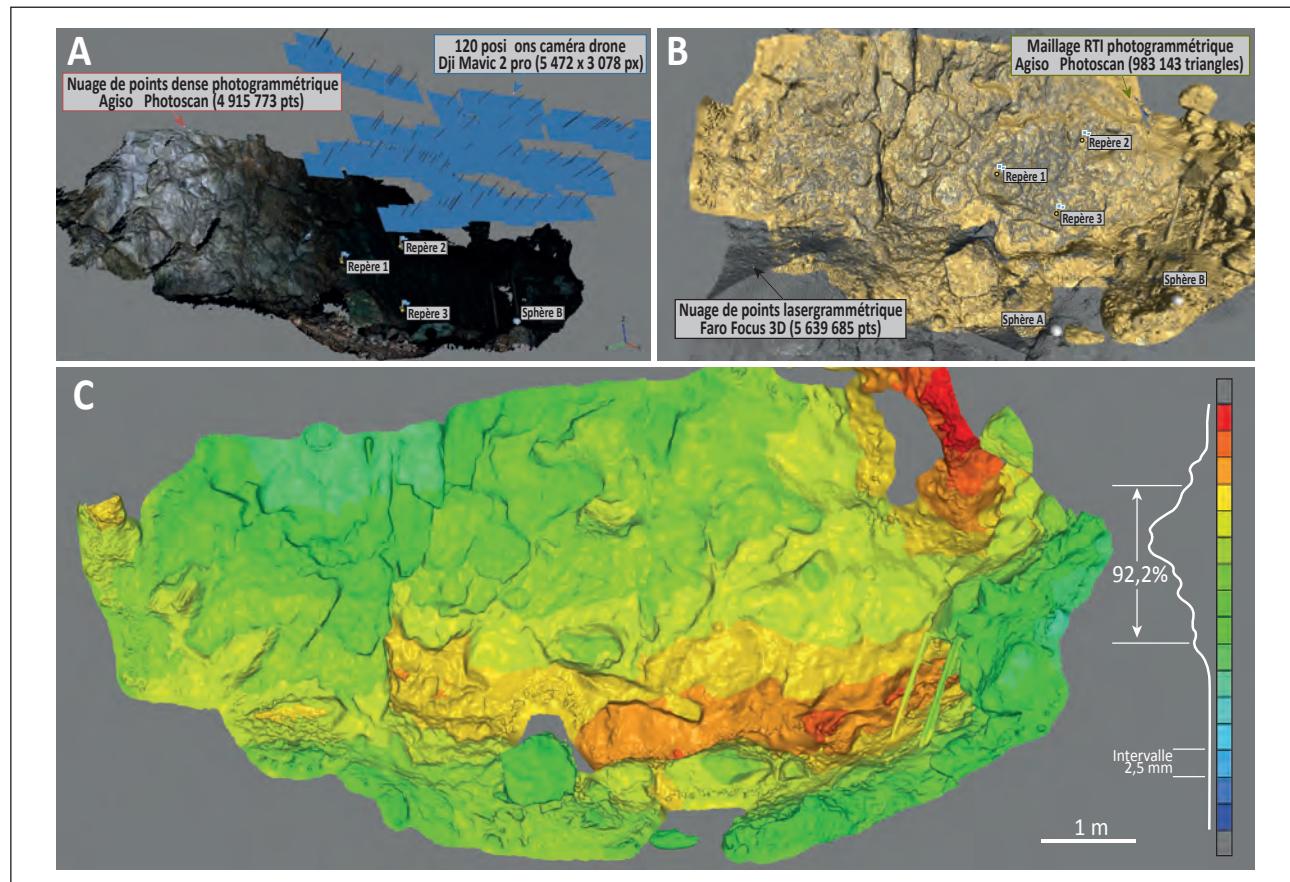
globale satisfaisante. Ici la partie droite du modèle est plus sombre que la partie gauche ce qui sur le terrain n'était pas identifiable à l'écran pour le télépilote. La multiplication des éclairages au sol, si le site est accessible, ou le recours à un éclairage embarqué sur le drone, donc toujours orienté dans l'axe de la caméra, pourrait constituer une solution à envisager pour corriger ce défaut.

III. Limites et potentialités futures des drones en grotte

En milieu confiné, les drones servent essentiellement les intérêts d'une documentation vidéo, photographique ou de modélisation 3D. Cependant, on l'aura compris, les conditions particulières de pilotage en grotte posent un certain nombre de problèmes et de limites tant pour la grotte que pour l'engin ou pour les personnes. Nous proposons ici de lister ces limites et de les regrouper en trois groupes principaux (figure 6).

Selon la topographie et selon l'espace des cavités investiguées, la sécurité de la grotte peut être compromise par les conditions dégradées du vol et par les mouvements d'air importants générés par les hélices. Le contact avec des stalactites, avec la paroi (possiblement ornée dans certaines cavités), le dérangement des animaux (chauves-souris) impliquent des restrictions majeures. En effet, ces mouvements d'air peuvent soulever des particules, remobiliser les dépôts détritiques, voire amorcer des courants d'air à l'échelle de toute la cavité

Figure 5 : Modèle 3D photogrammétrique (A) et modèle lasergrammétique de la paroi nord de la grotte Sainte-Catherine (Ariège). La paroi investie mesure ici environ 8 m de large et 4 de haut. Le modèle est construit par appariement d'un nuage de points acquis avec un lidar terrestre (Faro Focus) et un nuage photogrammétrique acquis par un drone (Mavic 2 pro) (B). Noter la paroi très sombre à droite et correctement éclairée à gauche (A). Un bon niveau de correspondance est obtenu entre les deux modèles (B). La comparaison des modèles (C) permet de montrer que 92,2 % des différences sont comprises dans un intervalle inférieur à 15 mm. Les points les plus mauvais se situant dans les creux (rouge, C) ou les bords (bleu, C).
Photogrammetric 3D model (A) and lasergrammetric model of the northern wall of the Saint Catherine cave (Pyrenees). The wall investigated here is about 8 m wide and 4 m high. The model is built by matching a cloud of points acquired with a terrestrial lidar (Faro Focus) and a photogrammetric cloud acquired by a drone (Mavic 2 pro) (B). Note the very dark wall on the right and correctly lit on the left (A). Note the good level of correspondence between the two models (B). The comparison of the models (C) shows that 92.2 % of the differences are within 15 mm. The worst points are in the depressions (red, C) or the borders (blue, C).



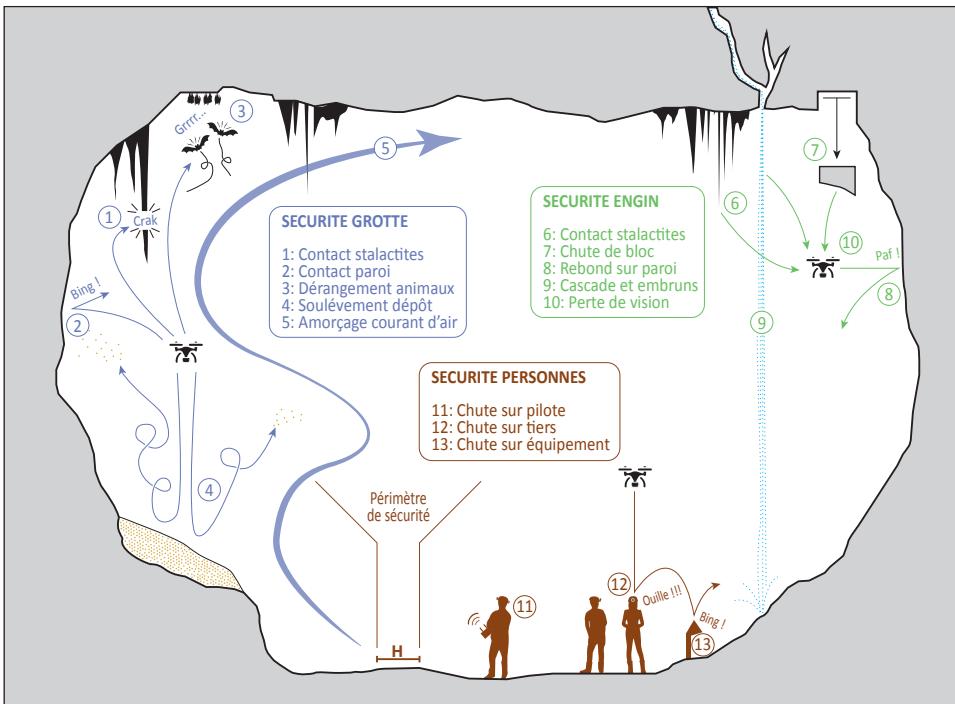


Figure 6 : Contraintes de sécurité pour le milieu souterrain, le drone et les personnes. Ces contraintes imposent des limites quant à l'usage des drones sous terre. *Safety constraints for underground environment, drones and people. These constraints impose limits on the use of drones underground.*

et modifier ainsi temporairement sa climatologie, son hygrométrie ou sa température (figure 6). La sécurité de l'engin lui-même n'est pas non plus garantie. Le contact avec les stalactites, les chocs contre la paroi, les chutes de blocs ou les éléments détritiques en suspension, la présence d'eau, la perte de vision (virage) sont autant d'éléments qui peuvent impacter rapidement l'intégrité de la machine. Le recours à des cages protectrices (figure 3) peut être une solution [Santagata *et al.*, 2022], mais dans les faits, elles ne suppriment pas le choc lui-même et peuvent même parfois constituer un autre problème en s'accrochant aux aspérités de la paroi et en déstabilisant l'engin dans son vol. Enfin la sécurité des personnes est compliquée par le milieu souterrain qui limite la dimension du périmètre de sécurité et peut conduire, lors de mauvaises manœuvres de pilotage, à des contacts avec le pilote, des tiers ou des équipements de la grotte (matériels, éclairage...).

Malgré ces nombreux écueils, inhérents aux conditions du milieu, les vols souterrains sont envisageables mais imposent au pilote des conditions de gestion du vol et de captation plus complexes car exigeantes. Rappelons qu'il incombe au pilote la double tâche de conduire le vol dans des conditions de sécurité satisfaisantes pour le milieu naturel (la grotte), pour l'engin et pour les personnes. Mais il lui incombe aussi la tâche d'assurer la captation des données elles-mêmes puisque le mode automatique n'est pas accessible. Or ces conditions de captation et de prises de vue sont dégradées par le milieu souterrain (ambiance sombre, humidité saturée, poussières, obstacles ponctuels). L'entraînement au pilotage et la bonne connaissance des prises de vues photogrammétriques restent un préalable indispensable.

Les drones sont essentiellement utilisés pour la captation d'images et autorisent la construction de modèles 3D [Triantafyllou *et al.*, 2019]. Mais d'autres usages souterrains sont envisageables dans le futur. L'inspection de

plafonds, le repérage de départs de galeries inaccessibles sans escalade, la reconnaissance de conduits de petite taille, tout cela devient désormais envisageable. La simple captation vidéo, offre un regard déporté sur les objets investis et permet de réaliser ces inspections sur place ou de les réaliser hors site, à plusieurs, sur écran, au retour de la mission. Ces images enrichissent la connaissance des milieux souterrains et constituent à ce titre un nouvel outil de documentation des grottes et du karst. Mais il n'est pas que l'inspection visuelle (photo ou vidéo) qui peut être envisagée. Dans le domaine de l'hydrologie par exemple, il sera intéressant d'embarquer thermomètre et conductimètre pour mesurer les paramètres physico-chimiques, par exemple d'arrivées d'eau perchées au plafond. Il pourrait être intéressant de prélever des gouttes d'eau au bout de fistuleuses. Pourquoi pas demain envisager des micro-carottages à distance pour prélever des échantillons de calcite sans envisager des escalades complexes et néfastes à l'intégrité du milieu ? Et plus intéressant encore, dans le domaine des grottes ornées, pour lesquelles on sait combien est limité le temps de présence, pourquoi ne pas envisager d'embarquer demain des spectromètres qui permettraient de s'approcher des pigments et de les analyser sans contact ? Et plus tard encore, pourquoi ne pas imaginer un drone capable de ressortir seul d'une cavité et de transmettre dehors des informations qu'il aurait acquises sous terre ? Certains drones évoluent déjà en siphon [Siegel *et al.*, 2022], d'autres marchent ou rampent. Pourquoi ne pas imaginer aussi un jour des systèmes polymobiles, capable à la fois de marcher, nager et voler en autonomie ?

Certes, nous n'y sommes pas encore. Les conditions de stabilité des vols souterrains, la miniaturisation, la capacité d'emport de charge, l'autonomie de vol sont autant de contraintes encore non résolues. À cela s'ajoute une limite majeure, la portée du signal radio qui lie le téléopérateur avec le drone et qui empêche pour

l'instant tout vol hors vue sur des développements de galeries conséquents (virages, masques...). Mais déjà, des drones font des captations infrarouges [Shopov *et al.*, 2022], inspectent des surfaces industrielles et gèrent des mesures avec contacts physiques. Le drone touche et agit sur la surface (voir à ce titre les développements de la société Skygauge Robotics). Des drones embarquent des seringues et traitent les nids de frelons asiatiques. Plus complexes encore, des programmes informatiques permettent de faire voler des centaines de drones en escadrille de manière synchronisée dans le cadre de spectacles son et lumière. On l'aura compris, les matériels comme les développements logiciels évoluent très vite et autorisent pour demain les usages les plus étonnantes si l'on en exprime le besoin.

Conclusion

À travers cette note, nous avons souhaité faire un point sur les usages des drones en milieux souterrains et leurs potentielles évolutions futures. Nous avons cherché à évaluer les paramètres conditionnant le vol souterrain et avons montré que selon les types de vol ou selon les configurations, différents systèmes sont activés ou non. Certains de ces systèmes (comme le mode vision) sont très dépendants des conditions d'éclairage, celui-ci pouvant être embarqué sur certains engins ou plus simplement disposé dans l'espace souterrain pour illuminer la scène. On a pu voir aussi combien la réalisation du vol souterrain implique des questions importantes tant pour la sécurité de la grotte que pour celle de l'engin ou des personnes.

La captation de photographies autorise la construction de modèles 3D. Le test réalisé dans la grotte Sainte-Catherine montre, à ce titre, un très bon niveau d'appariement entre le modèle obtenu par lasergrammétrie terrestre, servant de référence, et le modèle

photogrammétrique obtenu à partir des images drones. Ce résultat encourageant permet d'envisager des constructions 3D plus importantes, même en condition lumineuse faible et dans des zones difficilement accessibles et/ou dangereuses où l'usage de la lasergrammétrie terrestre serait impossible. Pour demain, tous les rêves semblent donc permis quant à l'usage des drones en milieux souterrains et ceci pour des activités bien plus complexes telles que des mesures physiques, des prélèvements et/ou des activités liées à la sécurité des spéléologues. Qui aurait pu dire il y a 20 ans, alors que la lasergrammétrie était balbutiante, que nous ferions des modèles 3D photogrammétriques de grottes avec des drones ? Qui peut dire ce que nous ferons dans les grottes, dans 20 ans, avec ces drôles de petits engins ?

Remerciements

Cet article fait suite à l'atelier CNRS « Drones Souterrains » qui s'est tenu du 7 au 10 novembre 2022 sur le site de la Station Écologique Théorique et Expérimentale de Moulis (CNRS / Université Toulouse P. Sabatier). Cet atelier était organisé par les réseaux de métiers CNRS « Milieux Souterrains et Karst » et « Drones & Cap » et nous remercions les instituts INSU, INEE et INSHS ainsi que la MITI du CNRS qui ont soutenu cet atelier technique et ont permis les échanges et tests qui ont conduit à la réalisation de cet article. Nous remercions aussi Antoine Méric de la société Multinnov, pour sa disponibilité, sa relecture et son goût du partage. Nous remercions aussi Johan Berthet pour sa relecture et ses orientations bibliographiques qui ont permis d'améliorer le manuscrit. Merci enfin à toute l'équipe du site de Moulis, en particulier Sabine Holliger et Olivier Guillaume, pour l'accueil et la disponibilité.

Bibliographie

- DENG H., ARIF U., YANG K., XI Z., QUAN Q. and CAI KY., 2020 - Global optical flow-based estimation of velocity for multicopters using monocular vision in GPS-denied environments. *Optik*, Elsevier, Vol. 219, 164923.
- DEROME M., 2017 - *Vision stéréoscopique temps-réel pour la navigation autonome d'un robot en environnement dynamique*. Thèse Mathématique et Informatique, Univ. Paris Saclay, 161 p.
- EYNARD D., 2011 - *Capteur de stéréovision hybride pour la navigation des drones*. Thèse Science, mention automatique, Univ. Picardie Jules Verne, 137 p.
- JAILLET S., SADIER B., PERAZIO G. et DELANNOY J.-J., 2014 - Une brève histoire de la 3D en grotte. *Karstologia* n°63, FFS, AFK, p. 3-20.
- JAIN K., 2021 - How Photogrammetric Software Works: A Perspective Based on UAV's Exterior Orientation Parameters. *J Indian Soc Remote Sens* 49, p. 641-649.
- JORDAN S., MOORE J., HOVET S., BOX J., PERRY J., KIRSCHKE K., LEWIS D. and TSZ HO TSE Z., 2018 - State-of-the-art technologies for UAV inspections. *IET Radar Sonar Navig.*, Vol. 12 Iss. 2, p. 151-164.
- LUISET B., 2016 - *Développement d'un baromètre-altimètre à bord d'un drone*. Mémoire Ingénieur Conservatoire Nat. Arts et Métiers, Ecole Sup. Géomètres Topographes, 78 p.
- MÖRTL C., BARATIER A., BERTHET J., DUVILLARD P-A. and DE CESARE G., 2022 - GALET: A deep learning image segmentation model for drone-based grain size analysis of gravel bars. *Proceedings of the 39th IAHR World Congress*, Granada, Spain, p. 5326-5335.
- SANTAGATA T., SAURO F., VATTANO M., LE PIVAIN G. and BRIOD A., 2022 S - Cave exploration and documentation through « collision-tolerant » drones. *18th Int. Congress Speleology*, Symp.09, Vol. 6, Karstologia Mémoires n°26, p. 21-24.
- SHOPOV Y., OGNIANOV O. and PETKOVA K., 2022 - Remote Location of unknown caves by Thermal Cameras. *18th Int. Congress Speleology*, Symp.09, Vol. 6, Karstologia Mémoires n°26, p. 127-130.
- SIEBERTH T., WACKROW R. and CHANDLER J.H., 2016 - Automatic detection of blurred images in UAV image sets. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. Vol. 122, p. 1-16.
- SIEGEL V., STONE W., RICHMOND K., HARMAN J., FLESHER C. and TANNER N., 2022 - Survey and 3D mapping of underwater caves using a SUNFISH AUV. *18th Int. Congress Speleology*, Symp.09, Vol. 6, Karstologia Mémoires n°26, p. 51-54.
- TRIANTAFYLLOU A., WATLET A., LE MOUÉLIC S., CAMELBECK T., CIVET F., KAUFMANN O., QUINIF Y. and VANDYCKE S., 2019 - 3-D digital outcrop model for analysis of brittle deformation and lithological mapping (Lorette cave, Belgium). *Journal of Structural Geology*, 120, p. 55-66.