

DIDRO, un outil intégré pour l'auscultation des digues par drone

DIDRO, an integrated tool for levees survey by drone

D. Boggio¹, J-L. Sorin², M. Pierrot-Deseilligny³, R. Tourment⁴, G. Rabatel⁵, R. Antoine⁶, E. VanLiempt⁷,
J-F. Biscay⁸, B. Albouze⁹

¹ Geomatys, Arles, david.boggio@geomatys.com

² IFSTTAR, Nantes, jean-luc.sorin@ifsttar.fr

³ IGN, Saint-Mandé, marc.pierrot-deseilligny@ensg.eu

⁴ IRSTEA, Aix-en-Provence, remy.tourment@irstea.fr

IRSTEA, Montpellier, gilles.rabatel@irstea.fr

⁵ CEREMA, Rouen, raphael.antoine@cerema.fr

⁶ Survey Copter, Pierrelatte, edouard.vanliempt@survey-copter.com

⁷ Entente Valabre, Gardanne, jf.biscay@valabre.com

⁸ Atechsys Engineering, Pourrières, benoit.albouze@atechsys.fr

Résumé

L'usage des drones se démocratise, ouvrant pour les gestionnaires de digues des perspectives de reconnaissance et d'auscultation de leurs ouvrages par voie aérienne à des coûts d'opération raisonnables. L'instrumentation de mesure se miniaturise, son coût diminue, et permet une vision globale et profonde des infrastructures, souvent au-delà de ce que peut détecter l'humain, ou avant que les conséquences d'une anomalie majeure ne soient visibles à l'œil nu. DIDRO est un consortium de chercheurs et d'industriels, réunis sous l'impulsion d'opérateurs de drones et de gestionnaires de digues. Trois ans de travaux ont permis de mettre au point des techniques d'acquisition d'image et d'interprétation des résultats pour l'aide à la détection de désordres sur les ouvrages. Cette communication présente le dispositif d'acquisition de données par drones et les outils d'aide à la décision issus d'une acquisition de données par drones. Deux drones volants à usage professionnel sont évalués et leurs caractéristiques comparées, afin d'en dresser les conditions d'utilisation et le type d'équipement qu'ils peuvent embarquer. Des capteurs adaptés à l'auscultation des digues sont également présentés. Les phénomènes qu'ils permettent de mettre en évidence sont décrits, ainsi que les protocoles d'acquisition de mesures et d'analyse des données recueillies. L'outil drone équipé, associé à une plateforme numérique d'analyse de données métier, est un allié précieux du gestionnaire de digues dans la collecte d'informations concordantes à grande échelle, lui permettant de cibler les zones sensibles de l'ouvrage.

Mots-Clés

Reconnaissance, auscultation, digues, drones, prévention

Abstract

The use of unmanned aerial vehicles is becoming more accessible, opening the way for managers of levees to examine their structures by air at reasonable operating costs. Measurement instrumentation is becoming smaller and smaller, and allows a global and profound view of the infrastructures, often beyond what the human being can detect, or before the consequences of a major anomaly are visible to the human eye. DIDRO is a consortium of researchers and industrialists, brought together by drone operators and dike managers. Three years of work have allowed to select and adapt high-performance detection instruments and set up a decision making oriented analysis of the results. This communication presents the devices for acquiring data by drones, and decision support tools derived from data acquisition by drones. Two flying drones for professional use are evaluated and their characteristics compared, in order to establish the conditions of use and the type of equipment that they can embark. Sensors adapted to the auscultation of levees are also presented. The phenomena that they make it possible to highlight are described, as well as the protocols for acquiring measurements and analyzing the data collected. The equipped drone tool, combined with a digital business data analysis platform, is a valuable ally of the levee manager in collecting large-scale concordant information, enabling him to target sensitive areas of the structure.

Key Words

Investigation, monitoring, levees, drones, prevention

Introduction

L'inspection des digues au moyen de drones couvre plusieurs enjeux :

- Optimisation des coûts et performances des examens visuels réguliers, des investigations et de l'auscultation pratiqués par les gestionnaires de digues.
- Construction ou actualisation d'une base de connaissance sur les ouvrages, notamment lors du transfert de la compétence de gestion des digues (mise en place de la GEMAPI).
- Limitation des risques liés aux interventions en contexte de crise, l'accès direct aux ouvrages présentant un risque majeur pour les agents de gestion des digues.

Cette communication présente dans un premier temps les équipements mobilisés dans le cadre de ce projet et les résultats qu'ils ont permis d'obtenir, puis analyse les usages de l'outil DIDRO pour l'auscultation des digues et la gestion des crises.

Deux drones volants pour des usages complémentaires

Le dispositif DIDRO fait intervenir deux vecteurs distincts pour deux types de mission différents, chacun répondant à un besoin spécifique. L'un, le drone patrouilleur, est un modèle de type avion à vitesse d'évolution élevée mais à charge utile limitée. Il se destine aux missions de diagnostic rapide à longue portée. L'autre, le drone hélicoptère, peut quant à lui embarquer une charge utile plus importante mais se déplace plus lentement. Il est indiqué pour les missions d'inspection approfondie.

Un drone patrouilleur pour les missions longue distance



FIGURE 1 : DRONE PATROUILLEUR ALIACA

Le drone ALIACA [Figure 1], développé par la société Survey Copter, est dédié aux missions de reconnaissance longue distance. Il décolle au moyen d'une catapulte, et peut atterrir sur une surface plane de type prairie, ou dans un filet vertical. Il embarque un plan de vol automatique, et peut parcourir 50 km le long d'une digue et revenir à son point de départ.

La charge utile est composée :

- d'une caméra CCD couleur
- d'une caméra thermique

Les images de ces deux caméras sont retransmises au sol en temps réel pendant le vol.

TABLEAU 1 : CARACTERISTIQUES TECHNIQUES DU DRONE ALIACA

Type	ALIACA-D
Envergure	3 m
Masse maximale au décollage	12 kg
Charge utile maximale	1,1 kg
Moteurs	Électrique
Autonomie maximale	2h40
Portée	50 km

Un drone hélicoptère pour les études approfondies



FIGURE 2 : DRONE HELICOPTERE COPTER-4

Le drone COPTER-4 [Figure 2], également développé par Survey Copter, est lui dédié aux missions d'auscultation approfondie. Il peut effectuer des vols stationnaires, et embarquer plusieurs capteurs, pour une charge utile totale de 5 kg. Il est équipé des mêmes caméras CCD et thermique que l'Aliaca, dont les images sont également transmises en temps réel à la station sol. Il peut évoluer grâce à un plan de vol automatique, ou être dirigé par un pilote au sol.

TABLEAU 2 : CARACTERISTIQUES TECHNIQUES DU DRONE COPTER-4

Type	Copter 4-D
Diamètre rotor	2,2 m
Masse maximale au décollage	30 kg
Charge utile maximale	5 kg
Moteurs	2 x Thermique 2T 26 cc
Autonomie maximale	2h30
Portée	50 km

Le Lidar pour détecter les anomalies topographiques

Embarqué sur le drone hélicoptère COPTER-4, le Lidar (Surveyor, Yellowscan, Montferrier, France) permet d'obtenir très rapidement un modèle numérique 3D, dont la précision peut être améliorée par un post-traitement.

Principes de fonctionnement du Lidar

Un faisceau laser balaye la surface à analyser. Les principaux échos sont détectés, et leur longueur de trajet évaluée. Le balayage laser est couplé avec un GPS RTK et une centrale inertielle, permettant de déduire la position absolue de chaque écho.

À partir de ces données, les coordonnées d'un nuage de points sont obtenues, ce qui permet d'établir un modèle numérique de terrain (sans végétation) et de surface (avec végétation).

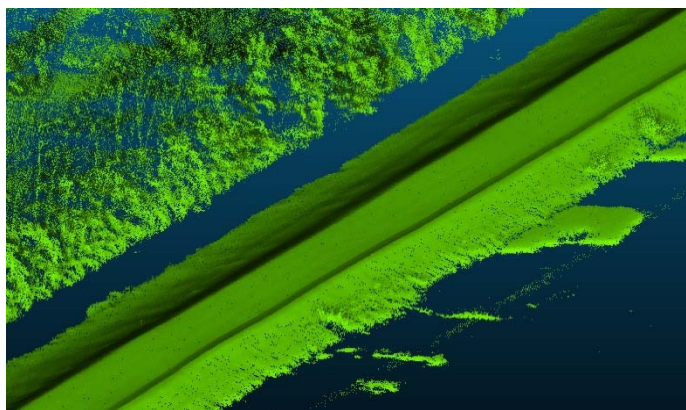


FIGURE 3 : RELEVÉ LIDAR DE LA DIGUE DE LA PALIERE (GESTION CNR) PAR UN LIDAR YELLOWSCAN EMBARQUE SUR UN DRONE COPTER-4 (IRSTEA, OCTOBRE 2017)

Le faisceau laser pouvant traverser la végétation, le Lidar permet d'obtenir un modèle de la surface nue. En quelques minutes de traitement, un modèle d'une précision altimétrique sub-métrique est obtenu. Après post-traitement et synchronisation avec une station GPS fixe RTK, la précision altimétrique est de l'ordre de 5 cm.

En période de crise, le Lidar peut être très efficace pour repérer et localiser rapidement :

- les affaissements, brèches ou effondrements importants de l'ordre du mètre,
- l'érosion de la digue côté eau,
- des glissements de berge.

Il permet également d'évaluer l'étendue d'un plan d'eau.

En surveillance de routine, le Lidar permet de repérer, après post-traitement, des déplacements ou variations d'altitude de l'ordre de quelques centimètres, y compris en présence de végétation, entre autres :

- affouillements en pied d'ouvrage ou de berge,

- tassements,
- effondrements,
- amorces de glissements.

Une caméra thermique pour détecter les zones d'infiltration d'eau

La méthodologie employée consiste à survoler l'ouvrage avec le drone, muni d'un capteur thermique de très haute résolution (Infratec Variocam HD) et fournissant des images de taille 1024*768 pixels, avec un taux de recouvrement important [Figure 4]. Après pré-traitement, les images thermiques acquises servent de base à la réalisation d'un modèle de températures de surface de la digue en 3 dimensions [1]. Cette modélisation, combinée à l'imagerie visible 3D, permet d'interpréter avec finesse les températures de surface de l'ouvrage, pour la détection de contrastes de température (de plusieurs degrés) potentiellement associés à des zones de fuites au travers de l'ouvrage en terre [Figure 4]. Ces travaux sont basés sur les résultats de plusieurs années de l'équipe ENDSUM du Cerema Normandie-Centre sur la compréhension des phénomènes thermiques dans les sols, en collaboration avec l'IFSTTAR.

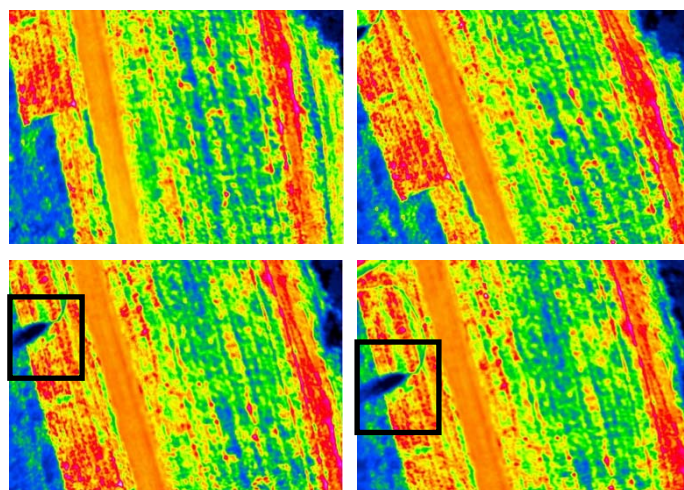


FIGURE 4 : EXEMPLE D'IMAGE THERMIQUE ACQUISE LORS DU PASSAGE DU DRONE ET UTILISEE POUR LA MODELISATION 3D DES TEMPERATURES DE SURFACE. LA ZONE ENCADREE EST UNE ZONE DE FUITE SIMULEE SUR UN FLANC LORS DE L'ACQUISITION. LES ZONES CHAUDES SONT DE COULEUR ROUGE-VIOLETTE ET LES ZONES FROIDES DE COULEUR BLEUE.

Photogrammétrie : des mesures précises au départ d'images aériennes

Le drone embarque une caméra mise au point par l'IGN qui, en plus d'être très légère et donc adaptée aux missions aériennes, permet d'effectuer des mesures topographiques de grande précision.

Effectuer des mesures précises par photogrammétrie (vision par

ordinateur) depuis un bloc d'images se recouvrant n'est réalisable qu'à la condition que les déformations géométriques de l'appareil photographique soient connues. Ce sont ces distorsions qui modifient la trajectoire des faisceaux lumineux qui impressionnent le capteur, et qui, en l'absence de celles-ci, présenteraient une trajectoire rectiligne.

Micmac : le logiciel de traitement d'image

En vue du suivi des digues par drone, l'Institut National de l'information Géographique et forestière (IGN) répond à ce défi au moyen d'une judicieuse combinaison de 2 capteurs et d'outils mathématiques regroupés en un logiciel de traitement d'images open source. La suite photogrammétrique Micmac [2], développée par l'IGN et ses collaborateurs, est un des rares logiciels libres qui permettent d'effectuer l'intégralité des traitements photogrammétriques nécessaires à une utilisation métrologique, c'est-à-dire relative à la science des mesures.

Camlight : le capteur photographique

Il s'agit d'une caméra dont les distorsions géométriques sont très faibles, dénommée "Camlight" (caméra légère, [3]). Son capteur plein format (matrice CMOS) et son optique de qualité (objectif fixe de 35 mm) permettent l'acquisition d'images nettes de très haute qualité (peu de bruit et haute résolution). En outre, cette caméra panchromatique est de dimensions et de poids réduits (moins de 500 g), afin d'en faciliter l'utilisation sur un vecteur aérien léger tel qu'un drone. Enfin, une puce GPS y est intégrée et les efforts de conception ont visé à obtenir un marquage spatio-temporel de très grande qualité : le déclenchement de la caméra est effectué par le GPS afin de parfaire la synchronisation entre les observations dudit GPS et le moment de prise de vue. En effet, la calibration géométrique de cette caméra nécessite de connaître la position au moment des prises de vue de manière précise. Mais ce GPS embarqué n'est néanmoins pas suffisant pour atteindre la très haute précision de mesures permettant le suivi du relief des digues et l'anticipation des dégradations touchant ces ouvrages.



FIGURE 5 : CAMERA LEGERE « CAMLIGHT », ILLUSTRATION ISSUE DE [4].

Geocube : le réseau de capteurs GPS, compromis entre prix et précision

Basé sur le récepteur GPS ublox neo m8t, ces GPS aux allures futuristes sont disposés sur la digue préalablement au vol du drone. L'ensemble des geocubes répartis le long de la digue, à raison de 2 par km de linéaire, forme un réseau. Les positions de ces GPS (fonctionnant en monofréquence avec les systèmes de satellites Américains (GPS) et Russe (Glonass)) sont calculées a posteriori par calcul différentiel afin d'atteindre une précision sous le centimètre [3]. Ces GPS ne sont pas les plus précis du marché, leur philosophie de conception est tournée vers un compromis entre prix et précision. Leur faible coût (~1000 €) permet d'en disposer en quantité afin de remplir les trois objectifs suivants :

- utilisés en combinaison avec le GPS embarqué dans la caméra, les geocubes permettent de contraindre le modèle photogrammétrique et d'appréhender avec justesse les distorsions géométriques de la caméra,
- utilisés indépendamment, les geocubes offrent un moyen de contrôle qualité des résultats photogrammétriques,
- enfin, certains geocubes sont placés à demeure sur les digues "à risque" dans le but de détecter des déplacements fins de l'ordre de quelques millimètres. Les géocubes sont d'ores et déjà utilisés pour le suivi de déformations millimétriques d'ouvrages de génie civil (ponts) ou de zones naturelles plus étendues telles que le dôme du volcan de l'Etna.



FIGURE 6 : CAPTEURS GPS GEOCUBE

DIDRO : le diagnostic multi-critères grâce à une plateforme multi-capteurs

Une architecture mécanique porte-outils

La plateforme DIDRO est conçue avec deux objectifs :

- accueillir un ou plusieurs capteurs sans nécessiter de maintenance complexe : à partir d'une mécanique dite "Clic-Clac", les capteurs sont arrimés à la nacelle porte-outils,
- être adaptable sur plusieurs modèles de drones, de façon à être utilisée par des appareils actuels, à venir, de location ou propriété du gestionnaire de digues.

La société Atechsys Engineering, basée à Pourrières (83), a conçu et développé une plateforme qui permet l'emboîtement

des capteurs, et leur montage et démontage rapide.

Exemple de mise en œuvre sur une percolation simulée

Un essai de détection de percolation sur une digue a été conduit en juin 2018 sur une digue de la Loire, dans la localité de Bou (Loiret, France). Un écoulement d'eau le long de la digue a été simulé au moyen d'un pompage dans le lit du fleuve, et déversé le long du talus.

Un drone Copter-4, équipé de caméra haute définition Camlight et de caméra thermique Variocam a effectué un survol de la digue et procédé à une acquisition d'images.

L'utilisation conjointe de la photogrammétrie (pour la mise au point du modèle numérique de terrain) et de l'imagerie thermique ont permis de localiser précisément de l'anomalie résultant de l'écoulement d'eau.

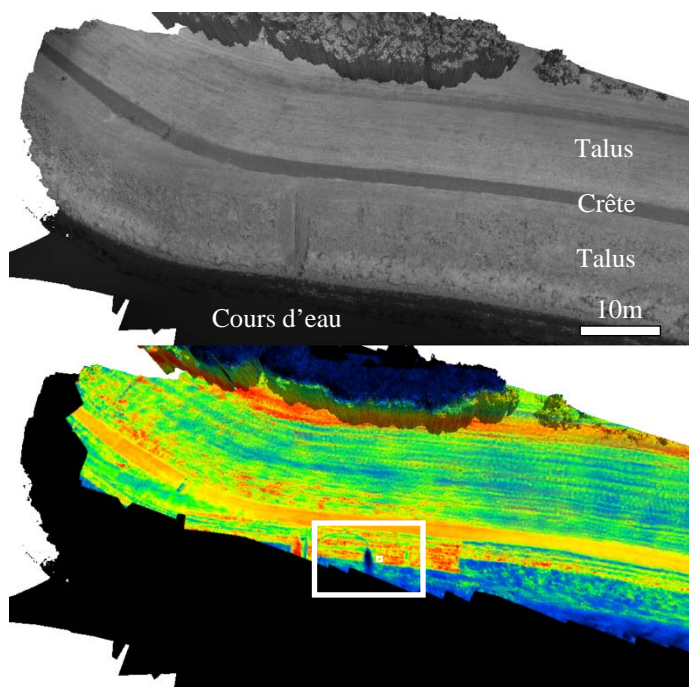


FIGURE 7 : MODELE NUMERIQUE DE TERRAIN ISSU DE PHOTOGRAMMETRIE (EN HAUT) ET PLAQUAGE D'UNE IMAGE THERMIQUE (EN BAS) POUR L'OBTENTION D'UNE IMAGE THERMIQUE EN 3D. L'ANOMALIE DE TEMPERATURE EST REPEREE PAR LE CARRE BLANC.

D'autres capteurs en cours d'intégration

Plusieurs capteurs sont actuellement testés, de façon à évaluer leur opportunité pour l'auscultation des digues. Il s'agit notamment de capteurs de :

- mesure de potentiels spontanés de polarisation électrique, qui permet de localiser l'origine d'un écoulement,
- tomographie de résistivité électrique, méthode fréquemment utilisée pour la reconnaissance des digues,

- géomagnétisme, méthode géophysique ancienne mais peu ou pas encore exploitée sur les digues.

D'autres dispositifs sont à l'étude, notamment pour la mesure de la vitesse du courant, de la hauteur d'eau ou de la turbidité.

Qu'apportent le drone et ses capteurs pour la surveillance des ouvrages ?

En période de sollicitation hydraulique

En situation de crue, les informations fournies par le dispositif DIDRO permettent de dresser rapidement un état des lieux en cas d'anomalie sur un ouvrage, et sans nécessiter de déplacement d'une équipe sur place, dans des conditions qui l'exposeraient à un danger. Les données ainsi collectées permettent de :

- disposer d'éléments cartographiques à jour d'une situation de crise
- de mesurer les hauteurs d'eau et leurs évolutions
- de connaître les chemins d'écoulement interne possibles de l'eau et les zones de stockage potentielles
- d'évaluer la profondeur d'une zone sinistrée
- de calculer des surfaces ou des volumes d'eau

En période normale

L'acquisition de données dans le visible et l'infrarouge thermique HD par drone permet :

- d'obtenir des informations sur la géométrie 3D des structures à haute définition et à bas coût (indispensable pour les études de danger ou les études hydrauliques avancées dans des zones critiques). Dans les zones où les données topographiques actuellement disponibles pour les études de danger/hydrauliques sont peu précises, le drone DIDRO permet de cibler des zones (sur plusieurs kilomètres) et de reconstituer la géométrie des structures par méthode photogrammétrique, avec une précision pouvant atteindre le centimètre,
- en comparant ces informations à des instants différents, d'analyser l'évolution de cette géométrie (affaissements, affouillements, glissements de flancs, etc.), notamment dans les périodes de maintenance des structures. La précision de ces modèles en altitude est pluri-centimétrique (< 10 cm), voire centimétrique dans certains cas. En périodes de crise, l'analyse combinée des données LiDAR, visible et infrarouge thermique permettra à terme d'aider à la décision, dans le cas de ruptures potentielles et/ou de recherche de personnes en danger,
- de détecter potentiellement des fuites et/ou certains défauts dans les structures (par l'analyse conjointe des températures de surface, de la géométrie 3D et de données d'imagerie (magnétique, potentiels spontanés, imagerie électrique)). Cet aspect est particulièrement intéressant dans le cas des structures en charge et des structures interagissant avec des cavités naturelles

(système karstique). Une caméra thermique HD permet en effet aujourd'hui de détecter avec précision des anomalies de température (associées à des défauts ou des fuites) aussi faibles que 2 degrés Celsius.

Une restitution des résultats dans une plateforme centralisée multi-acteurs

La combinaison de l'ensemble de ces données en 3 dimensions dans un système SIG permet une visualisation aisée de la structure, facilitant ainsi l'analyse des informations, le diagnostic des experts et la prise de décision par les gestionnaires.

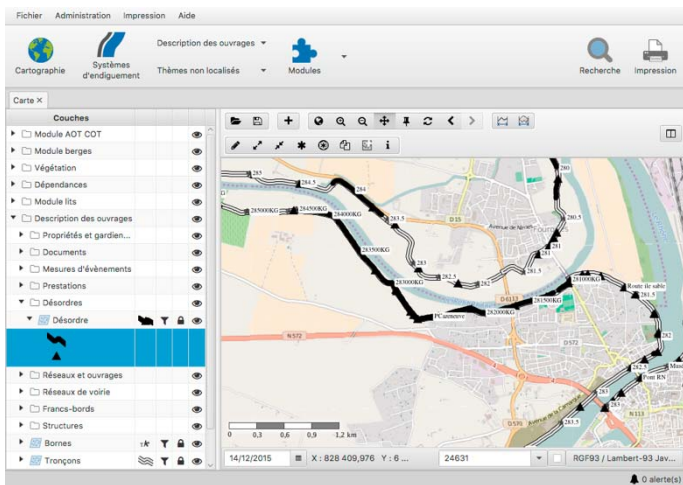


FIGURE 8 : VISUALISATION DE DONNEES DE DIGUES DANS UN SYSTEME D'INFORMATION GEOGRAPHIQUE, ICI LE LOGICIEL SIRS-DIGUES v2 (FRANCE DIGUES, 2016)

La société Geomatys, basée à Arles (13), met au point une plateforme complètement automatisée de remontée, traitement, analyse et restitution des données. Elle permet :

- aux gestionnaires de digues de signaler les ouvrages à inspecter,
- aux opérateurs de drones de préparer les vols et charger les fichiers de données acquises,
- aux experts d'analyser les données élaborées,
- enfin, aux gestionnaires de digues de consulter les informations graphiques et analytiques sur l'état de leurs ouvrages.

Les opérations complexes de traitements colorimétriques, de corrections géométriques des prises de vue et d'analyse photogrammétrique sont automatisées, de façon à réduire au maximum la durée écoulée entre la prise de vue et la mise à disposition des résultats.

Conclusion

DIDRO est un dispositif d'auscultation de DÎgues par DRONES, qui réunit autour d'un groupe d'experts des digues et des phénomènes géophysiques qui régissent leur évolution, des professionnels de l'acquisition et du traitement d'images de drones. Après trois années de mise au point, les protocoles d'acquisition, de traitement et d'interprétation ont été définis, et consignés dans des notices opérationnelles. DIDRO propose ainsi à ce jour aux gestionnaires de digues une plateforme multi-capteurs embarquée sur un drone, qui permet de détecter des désordres sur les digues, en inspection routinière ou en période de sollicitation hydraulique. Ce dispositif a été conçu de manière modulaire, de façon à pouvoir ajouter ou faire évoluer les capteurs, ou encore d'utiliser un autre drone volant. Ainsi la solution DIDRO n'est pas unique, mais peut s'adapter aux conditions de vol et aux paramètres mesurés. L'avenir de DIDRO est donc dans l'adéquation des moyens mis en œuvre aux attentes et contraintes des bénéficiaires. La veille technologique sur la mise en œuvre de nouveaux capteurs est également un enjeu central, afin de proposer un outil toujours plus performant et faire bénéficier les gestionnaires de digues de la miniaturisation et de la réduction de coût des équipements embarqués.

Remerciements

Les auteurs remercient les soutiens financiers de DIDRO : BPI France, la Région PACA, le Département de la Drôme pour leur appui précieux, ainsi que les représentants des futurs utilisateurs (France Digues, DREAL Centre pour les principaux) pour leurs conseils avisés.

Références

- [1] Antoine R., Lopez T. (2017), *Les températures proches de la surface, dans Manuel de Mécaniques des Roches*, Tome V - Thermomécanique des Roches par M. Gasc, V. Merrien-Soukatchoff, P. Bérest, Presse des Mines.
- [2] Rupnik, E., Daakir, M., & Deseilligny, M. P. (2017). *MicMac—a free, open-source solution for photogrammetry*. Open Geospatial Data, Software and Standards, 2(1), 14.
- [3] Martin, O., Meynard, C., Pierrot Deseilligny, M., Souchon, J. P., & Thom, C. (2014, June). *Réalisation d'une caméra photogrammétrique ultralégère et de haute résolution*. In Proceedings of the colloque drones et moyens légers aéroportés d'observation, Montpellier, France (pp. 24-26).
- [4] Daakir, M., Pierrot-Deseilligny, M., Bossier, P., Pichard, F., Thom, C., Rabot, Y., & Martin, O. (2017). *Lightweight UAV with on-board photogrammetry and single-frequency GPS positioning for metrology applications*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 127, 115-126.