

Conception de modèles 3D précis pour un suivi 4D optimisé des ouvrages hydrauliques linéaires : intérêt et particularité du drone

Vincent TOURNADRE¹, Jacques BEILIN¹, Marc PIERROT-DESEILLIGNY¹, Paul-Henri FAURE²

¹ Institut National de l'Information Géographique et Forestière, 77420 Champs-sur-Marne, France

² Compagnie Nationale du Rhône, Centre d'Analyse Comportementale des ouvrages Hydrauliques, Lyon France

RÉSUMÉ. – Confrontée au vieillissement de ses endiguements et à des conditions d'accès parfois dégradées, la Compagnie Nationale du Rhône, 2^{ème} producteur d'hydro électricité français, souhaite développer de nouveaux systèmes d'auscultation complémentaires aux capteurs et inspections visuelles déjà déployés sur ses ouvrages.

Les développements de drones, des capteurs photographiques et des algorithmes de calculs automatiques de modélisation 3D à partir d'images multi-stéréoscopiques permettent aujourd'hui d'obtenir la géométrie fine d'ouvrages linéaires via des modèles 3D. Actuellement, avec un réseau de point au sol dense, la précision atteignable est de l'ordre de 5 cm. Afin de pouvoir atteindre les précisions souhaitées (± 1 cm à ± 3 cm) tout en minimisant le nombre de points au sol, et donc le temps terrain, la CNR et l'Institut National de l'Information Géographique et Forestière (IGN), ont mis en place un partenariat aboutissant à la réalisation d'une thèse de recherche sur la métrologie par photogrammétrie aéroportée légère appliquée au suivi d'évolution de digues.

L'article s'attache à présenter dans un premier temps le contexte du projet à travers la description de la surveillance actuelle des endiguements et des nouveaux besoins en auscultation de la CNR. La suite s'appuie sur une étude de cas sur la digue de la Palière pour présenter les avancées des méthodes photogrammétriques qui permettent à mi 2015 d'atteindre des précisions centimétriques avec seulement 1 point de calage au sol par tranche de 100 mètres.

Situé à la croisée du monde des drones, de la recherche en algorithmes photogrammétriques et des besoins de concessionnaires d'ouvrages, ce projet débouchera fin 2015 sur un système d'auscultation renforcé permettant un suivi centimétrique de zones sensibles des endiguements CNR. Les nouveaux algorithmes photogrammétriques écrits dans un environnement open-source seront ouverts à l'ensemble de la communauté scientifique et les problématiques résolues (mesures géoréférencées de haute précision sur des ouvrages linéaires) seront utilisables par d'autres concessionnaires ou prestataires sur d'autres ouvrages présentant la même géométrie.

Mots-clés : drone, auscultation, digue, métrologie, photogrammétrie

Accurate 3D models for a 4D monitoring of linear hydraulic structures: opportunities and characteristics of UAV

Confronted with the ageing of its dikes and with the sometimes degraded conditions of access, the *Compagnie Nationale du Rhône*, the 2nd producer of hydro electricity in France, wishes to develop new systems of auscultation complementary to the sensors and visual inspections already deployed.

The developments of drones, photographic sensors and algorithms of automatic calculations of 3D modelling from multi-stereoscopic images allow today to obtain the fine geometry of linear works via 3D models. At present, with a network of point to the dense ground, the reachable precision is of the order of 5 cm.

In order to achieve the desired specifications (± 1 cm ± 3 cm) while minimizing the number of points on the ground, and thus the time field, CNR and the National Institute of Geographic and Forest Information (IGN) have established a partnership resulting in the completion of a research thesis on metrology by light airborne photogrammetry applied to the monitoring of developments dikes.

The paper attempts to present the context of the project through the description of the current monitoring of embankments and of the new needs in auscultation of CNR. The following, based on a case study on the dike of the Palière is introducing advanced photogrammetric methods to mid 2015 to reach centimeter details with only 1 setting point ground for every 100 meters.

Located at the interface of the world of Drones, of Research in photogrammetric algorithms and of concessionaires needs, the project will lead to the end of 2015 to an enhanced testing system allowing centimeter monitoring of sensitive embankments areas. The new photogrammetric algorithms written in an open source environment will be open to the entire scientific community and solved problems (high precision geo measures on linear structures) will be used by other distributors on other works with the same geometry.

Key-words: UAV, drone, Monitoring, Dam, Photogrammetry, dyke, embankment

I. INTRODUCTION

La Compagnie Nationale du Rhône (CNR) est un grand industriel, concessionnaire du Rhône et second producteur d'énergie hydroélectrique Français. À ce titre, il a la charge d'entretenir et surveiller ses 400 kms d'endiguement, au même titre que ses barrages.

Le drone est un vecteur aérien en plein développement, permettant d'acquérir des images d'une résolution bien plus importante qu'avec les moyens aériens traditionnels. À travers un partenariat avec l'Institut National de l'Information Géographique et Forestière (IGN), l'idée a donc germé de combiner de tels clichés à travers un processus photogramétrique, et d'utiliser ces données pour optimiser le suivi météorologique de ses ouvrages.

Cependant, la précision des modèles 3D est encore assez mal maîtrisée dans le cas où celui-ci est amené à être utilisé comme support de mesures. De plus, la géométrie même des ouvrages linéaires conduit à des phénomènes de dérives, observables par un effet de courbure, aussi appelé « effet banane ». Ces dérives sont un frein, puisqu'il faut installer un grand nombre de points d'appuis pour atteindre de bonnes précisions.

Cet article présentera les besoins et les attendus de la thèse co-financée par l'IGN et la CNR et illustrera les avancées technologiques (Ain).

II. L'AUSCULTATION DES DIGUES A LA CNR

En France la surveillance des ouvrages et donc des digues est régie par des textes réglementaires, les digues de canaux en charge permanente sont considérées comme des barrages en remblais avec l'application de la réglementation « Barrages » du décret de sureté de 2007. Comme concessionnaire du Rhône, la CNR doit s'organiser et se doter des systèmes adaptés pour surveiller ces ouvrages.

La surveillance s'appuie sur les trois composantes : surveillance visuelle, mesures d'auscultation et essais et contrôles.

II.1. Les digues CNR

Les Digue CNR représentent environ 400 km de linéaire entre la Suisse et la ville d'Arles avant la Méditerranée. Celles-ci ont été construites à partir des années 1950 et jusqu'à la fin des années 1980. Construites avec les

matériaux en place et perméables, ces ouvrages vieillissent et se doivent d'être surveillés de plus en plus finement.

II.2. Surveillance visuelle

Le premier chaînon de la surveillance des ouvrages et donc des digues passe par les agents de terrain et les rondes régulières réalisées sur site de manière hebdomadaire. Ces visites permettent la remontée de constats visuels sur les désordres apparents en surface de l'ouvrage.

II.3. Mesures d'auscultation

Les mesures d'auscultation permettant de quantifier des évolutions de la grandeur mesurée offre une vision historique du comportement de l'ouvrage. Les ouvrages linéaires tels que les digues, sont auscultés à l'aide de mesures ponctuelles de pressions interstitielles régulièrement réparties et implantées depuis l'origine.

L'ensemble des digues CNR est équipé de piézomètres permettant de suivre l'évolution du niveau d'eau dans le corps de digue. Ce niveau est mesuré en deux points du profil afin de pouvoir vérifier le bon rabattement hydraulique entre le Rhône et le contre canal (Figure 1.)

En complément des mesures piézométriques certaines zones sont suivies par des réseaux de repères de nivellement (± 1 mm) dans le cadre d'auscultation renforcée. Ces réseaux permettent d'avoir une vision partielle de l'ouvrage en quelques points.

II.4. Connaissance de la géométrie de l'ouvrage

Afin de compléter le dispositif de surveillance en vue d'anticiper au plus tôt les évolutions dues au vieillissement, la CNR souhaite développer les acquisitions permettant une définition géométrique continue de l'ouvrage. En effet cette dimension offrira à la CNR des levés successifs permettant des comparaisons et donc des détections d'éventuelles zones d'affaissement.

Des acquisitions ponctuelles au LIDAR terrestre ou aérien ont déjà été réalisées sur quelques zones réduites. Cependant l'utilisation de ce type de technologie reste coûteuse, fastidieuse et de précision peu satisfaisante (stations multiples, temps d'acquisition important, précision au mieux de ± 3 à 5 cm).

Face à ces enjeux et devant le développement des drones, la CNR s'est rapprochée de l'IGN pour étudier les capacités

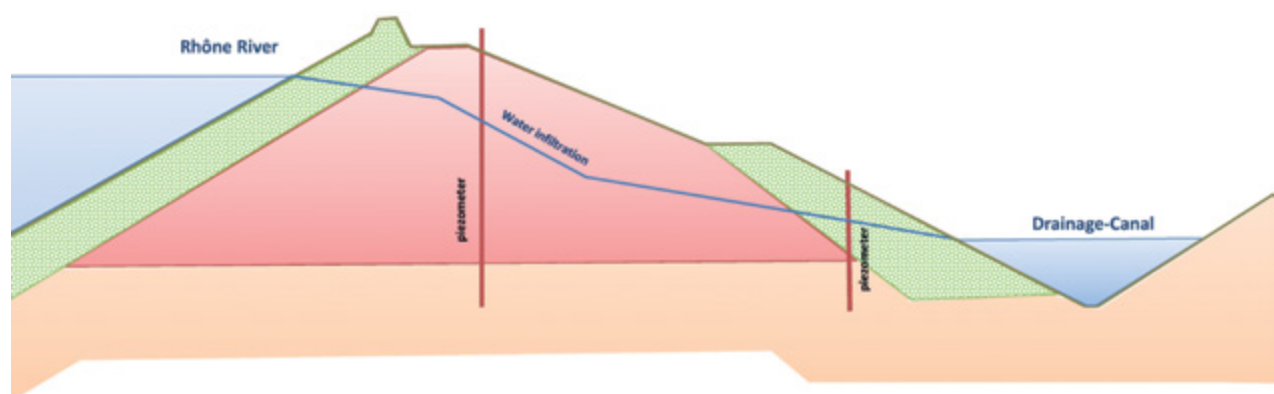


Figure 1 : Coupe transversale d'un endiguement CNR.

de ces systèmes pour de l'auscultation d'ouvrage linéaires tels que les digues.

III. PROJET DE RECHERCHE : METROLOGIE PAR PHOTOGRAMMETRIE AEOROPORTEE LEGERE

III.1. Contexte

Depuis quelques années les drones civils se développent particulièrement dans le cadre des inspections visuelles des ouvrages d'art. Leur utilisation pour de la topographie n'est pas nouvelle non plus, mais peu de prestataires ont de notions de photogrammétrie ou de topographie.

Les développements des appareils photos numériques, de la puissance de calcul des ordinateurs, les travaux de recherche en photogrammétrie et vision par ordinateur ont abouti à l'émergence récente de solutions opérationnelles permettant de construire de manière automatique des modèles 3D à partir de prises de vues à recouvrements multiples (multi stéréoscopiques). En embarquant un appareil photo grand public de bonne qualité sur un drone ou un ULM, il est aujourd'hui possible de réaliser de manière 100% automatique des modélisations visuellement « parfaites » ou en tout cas suffisante tant que ce modèle est utilisé comme support de communication [Pierrot-Deseilligny, 2011].

Par contre, les performances de ces méthodes sont encore mal maîtrisées dans le contexte où l'on veut utiliser le modèle 3D comme outil de mesure, notamment dans des problématiques de suivi d'évolution des ouvrages linéaires. Or il existe une demande forte des maitres d'ouvrage pour des systèmes capables d'assurer un suivi de mouvement 3D des sols avec une précision de quelques millimètres.

III.2. Réalité et intérêt du centimètre

Dans le cadre des mesures d'auscultation renforcée mises en place à la CNR sur les portions d'ouvrage soumises à des pathologies fortes (risques d'érosion interne par exemple),

la CNR souhaite pouvoir obtenir le plus en amont possible une information sur la déformation de la surface de la digue. La précision finale du modèle numérique de surface utilisée pour l'auscultation est issue des résultats d'un projet ERINOH (ERosion INterne des Ouvrages Hydrauliques). Durant ce projet, des essais sur modèle physiques ont montrés que des signes précurseurs étaient visibles en surface sous la forme de déformations centimétriques (± 2 à 3 cm) [Béguin, 2011]. Cette déformation n'est pas calculée par comparaison point par point car cela n'a pas de réalité physique, mais de modèle maillé à modèle maillé ce qui permet d'appréhender l'ouvrage dans sa continuité et sa globalité.

III.3. Les Besoins de la CNR

Dans le cadre de sa surveillance, la CNR a défini 2 besoins: des acquisitions récurrentes et des acquisitions exceptionnelles. Les principaux gains escomptés sont

- connaître finement la géométrie des ouvrages avec une précision centimétrique afin de pouvoir réaliser des comparaisons entre deux états successifs ;
- rapidité de mise en place et de traitement pour l'auscultation d'une portion d'ouvrage dans des conditions dégradées (séisme, accès perturbés etc.) ;
- relevés à moindre coût par rapport à des systèmes équivalents ;

III.4. Les objectifs

L'objectif est d'arriver à un système permettant, à partir de prises de vue aériennes légères, de connaître finement la géométrie des ouvrages de type digues avec une précision centimétrique afin de pouvoir réaliser des comparaisons entre deux états successifs ; il s'agit d'arriver à un système plus rapide, plus économique et offrant une géométrie plus fine et adéquate vis-à-vis des exigences réglementaires que les systèmes topométriques utilisés actuellement. Une innovation consiste en l'utilisation d'appareils photos numériques grand public comme outil de mesure pour les ouvrages déformables comme les ouvrages en terre et les ouvrages béton difficilement accessibles.

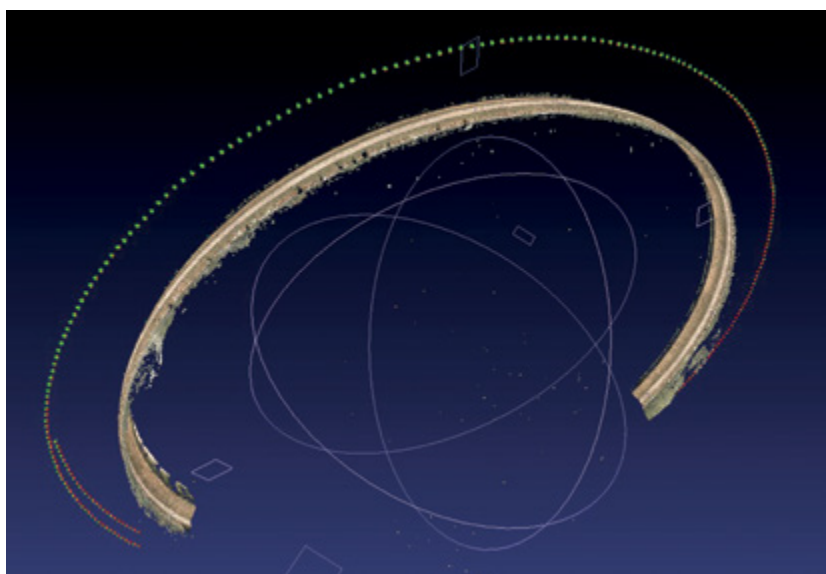


Figure 2 : Exemple de modélisation biaisée (algorithmes de 2011).

Tableau : Récapitulatif des besoins CNR.

Type d'Acquisition	Fréquence	Linéaire	Besoin	Incertitude Maximale Tolérée (mouvements que l'on souhaite pouvoir détecter)
Récurrente Surveillance Renforcée	1 fois / an	1 000 mètres	Détection de déformations dans le cadre du suivi d'une zone sensible bien définie	± 2.5 cm
Exceptionnelle	Situation de crise	Plusieurs km	Comparaison à un état initial pour la réalisation d'un état des lieux suite à un événement exceptionnel (séisme, crue, incident de navigation)	± 5 cm

III.5. Le projet

Le projet s'inscrit dans la suite du déploiement d'une solution de mesure photogrammétrique en 2010 sur le modèle physique ERINOH (ERosion INterne des Ouvrage Hydraulique) et à la suite d'essais grandeur nature réalisés sur une portion de digue en 2011 (Figure 3).

IV. ETUDE DE CAS

IV.1. Site de la Palière

La digue présente un linéaire de 1000 m pour une largeur moyenne de 60 m. Cette portion d'endiguement est suivie

par nivellement depuis sa construction en 1983. Depuis le début du projet ce site a été survolé plusieurs fois et sert donc de site de référence pour la thèse.

IV.2. Relevés

L'opération de relevé photographique par le drone ne nécessite en pratique que 2 h, et peut même être réduit à moins d'une heure. Les survols ont lieu à une altitude de 60 m, avec un appareil photographique grand public mais néanmoins de bonne qualité (Sony RX1). Il résulte des clichés couvrant un champ de 60 m par 40, offrant une résolution pixellaire d'un centimètre.

L'intervention la plus coûteuse est l'installation et le relevé des références, dont nous cherchons à minimiser le



Figure 3 : Macro planning du projet de thèse.



Figure 4 : Vue aérienne de la digue de la palière.



Figure 5 : Drone Hexacoptère de l'IGN.

nombre. Leurs coordonnées sont déterminées en GPS RTK et nivellement direct.

Fin 2012, les écarts moyens absolus obtenus sur les points de contrôle étaient de plusieurs décimètres, avec une dégradation fortement marquée en altimétrie (« effet banane ») [Tournadre, 2014]. Suite aux améliorations apportées aux algorithmes et à la réalisation des prises de vues, la précision finale, fin 2014, se rapproche des exigences fixées en début de thèse (Tableau 1 et Figure 6).

Afin de mieux appréhender cette précision, le protocole de contrôle a été amélioré afin d'intégrer des zones de contrôle en complément des points sols utilisés auparavant. L'utilisation de ces zones présente deux intérêts : comparer des données identiques et s'affranchir des défauts de modélisation au niveau des bornes. D'autre part, certifier la qualité d'un nuage d'une centaine de millions de point en utilisant 20 à 30 points de contrôle semble quelque peu hasardeux.

IV.3. Comparaison des modèles 3D

Lors de l'acquisition de septembre 2014, des zones de contrôle ont été matérialisées sur site et numérisées par photogrammétrie terrestre. Sur chaque placette, d'environ 4 m², 5 GCP¹ ont été matérialisés et déterminés en nivellement direct [Faure, 2014].

Les résultats sur les comparaisons entre le nuage « drone » et les maillages « terrestres » sont décrits dans le Tableau 1 et la Figure 6. Le modèle « drone » utilisant 6 GCP et chaque nuage sol utilisant 5 GCP.

V. CONCLUSION

Le projet présenté permettra à la CNR d'acquérir des moyens et des méthodes ciblés pour la surveillance de demain. CNR, en tant que concessionnaire exemplaire, s'est

Tableau 1 : Ecart moyens et écarts types entre le nuage « drone » et les nuages « sol ».

Zone	Ecart moyen (mm)	Sigma (mm)	Nombre de mesures
Z1	10,6	7,0	48 959
Z2	-0,1	6,3	63 359
Z3	2,2	5,6	62 793
Z4	2,8	5,8	78 539
Z5	0,2	6,2	72 423
Z6	1,1	6,6	66 057
Z7	-4,7	5,4	66 567
Z8	-1,7	5,0	78 379

associé à un référent européen dans la mesure topographique (IGN) pour mettre en œuvre un système innovant pour ses besoins propres d'auscultation des endiguements.

La thèse débouchera sur des algorithmes photogrammétriques écrits dans un environnement open-source ouvert à l'ensemble de la communauté scientifique. Les problématiques résolues (mesures géoréférencées de hautes précision sur des ouvrages des grand linéaires) seront utilisables par d'autres concessionnaires ou prestataires sur d'autres ouvrages présentant la même géométrie.

Les retours d'expérience sur les acquisitions photogrammétriques par drone, ont montré à la CNR et à l'IGN que même si ces technologies semblent faciles d'accès, le choix du capteur, du porteur et les méthodologies mises en œuvre sont extrêmement importants. La réglementation actuelle des drones limite, pour le moment, les possibilités de réaliser des mesures métrologiques sur des linéaires importants. Et les chaînes photogrammétriques « clef en main » ne permettent pas, pour le moment, d'atteindre les précisions nécessaires à l'auscultation d'ouvrage.

1. GCP : Ground Control Point ou point d'appui terrain

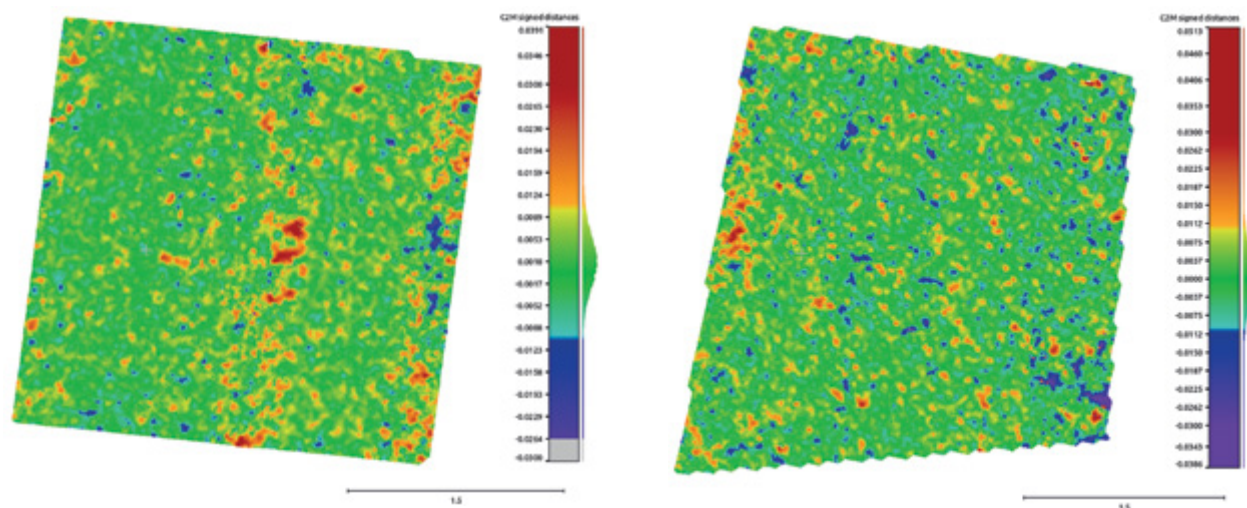


Figure 6 : Écarts entre les modèles terrain et le modèle drone.

Les auteurs suivent avec intérêt les derniers développements des capteurs (caméra CamLight de l'IGN) et des porteurs qui amèneront de nouvelles possibilités pour l'auscultation des ouvrages linéaires.

VI. REFERENCES

- BEGUIN, REMI. (2011) — Etude multi-échelle de l'érosion de contact au sein des ouvrages hydrauliques en Terre. *Thèse de doctorat. Université de Grenoble.*
- FAURE P.H., TOURNADRE V., BEILIN J., PIERROT-DESEILLIGNY M. (2014) — Métrologie par photogrammétrie aéroportée légère appliquée aux digues - Optimiser l'auscultation des ouvrages. *Revue XYZ – Association Française de Topographie.* **141** 47-54
- PIERROT-DESEILLIGNY M., CLERY I. (2011) — Évolutions récentes en photogrammétrie et modélisation 3D par photo des milieux naturels. *Jaillet S., Ployon E., Villemain T., eds., Images et Modèles 3D en Milieux naturels, Le Bourget-du-Lac, Collection Edytem.* **12** 51-66
- TOURNADRE V., PIERROT-DESEILLIGNY M., FAURE P. H. (2014) — UAV photogrammetry to monitor dykes – calibration and comparison to terrestrial LiDAR. *ISPRS-International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences.* **1(1)** 143-148